REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE





Université M'hamed Bougara Boumerdes

Faculté des Hydrocarbures et de la chimie
Département de Géophysique, Génie Parasismique et Phénomènes Aléatoires

Mémoire de fin d'études Pour l'obtention du diplôme
de Master en Géophysique Pétrolière

Thème :

Traitement et interprétation des données Aérogeophysiques (magnétiques et spectrométrie gamma) pour l'évaluation du potentiel en hydrocarbures de la région de Graret l'Edda (Bassin de Tindouf)

Présenté par :

M^{r}: Maiouf ismail

M^{r}: Missoum hafid

Promoteur :

M^{r}: Allek Karim

Juin 2014

Remerciements

Au terme de ce travail, on exprime notre gratitude au bon **Dieu** de nous avoir donné la force et la patience, ces fabuleuses valeurs sans lesquelles on n'aurait pas pu puiser de nouvelles forces pour mener à bien notre tâche.

Nos remerciements s'adressent également à notre promoteur **Mr Allek Karim** pour nous avoir proposée ce sujet, pour son soutien et sa gentillesse infinie. Sa disponibilité et son orientation.

On remercie les membres du jury qui nous font l'honneur de juger ce modeste travail. Nous n'oublierons pas d'adresser notre reconnaissance à nos enseignants du département de géophysique (FHC) qui n'ont pas ménagé leurs efforts .A qui nous adressons nos respects les plus sincères.

Nos remerciements vont aussi à **Mr A. Bouguerne** et **Mr M. Djeddi** Professeurs en Géophysique, **Mr Groune Daoud** Ingénieur du centre nucléaire (Alger) qui nous ont aidé et orienté à finaliser ce mémoire.

On remercie les responsables de la Bibliothèque de : **FHC, IAP**, **CRD** qui nous ont donné la chance de consulter leurs documentations pour compléter ce travail.

On n'oubliera pas de citer les ingénieurs de l'**ENAGEO** (Hassi Massoud) et à tous ceux qu'on a oublié, nous leur adressons également un grand merci et que dieu vous bénisse tous.

Merci

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail aux personnes qui me sont les plus chères sur cette terre : Ma Mère et mon Père.

A mes très chers frères et sœurs qui m'ont beaucoup encouragé sans oublier également leurs enfants.

A mon Promoteur Mr Allek Karim pour son disponibilité et son orientation.

A tous ceux que j'aime en particulier Abbas Fella qui occupe une grande place dans mon cœur.

A toute ma famille d'Ain Defla.

A tous les amis que j'ai eu la chance d'avoir et en particulier : mon binôme Hafid, Adem, El Aïd, Hocine, Rachid, Ramadhan, Sofiane, Ahmed, Mohamed, les étudiants du groupe IGP 08 et tous mes enseignants.

Et à tous ceux que j'aurai oubliés je leur adresse également ces Dédicaces.

Ismail

Dédicaces

J'ai le grand plaisir de dédier ce modeste travail : à mon très chère père.

A mon frère Mohamed.

A mon Promoteur : Mr Allek Karim

A tout la famille de loin ou de proche.

A tous mes amis en particulier : Mon binôme Ismail, Aboubaker, Mohamed, Khalil, Fouad.

A tous Mes amis de groupe IGP/08

Et enfin A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin durant les moments difficiles.

Hafid

Sommaire

Liste des figures et des cartes

Liste des tableaux

Introduction :

La méthode aérospectrométrique à rayon gamma est une technique de prospection radiométrique, avec un spectromètre installé dans un aéronef mesurant à une certaine altitude les spectres de rayons gamma émis spontanément par les formations du sol. Le traitement des mesures permet de déterminer la radioactivité totale du sol et ses teneurs en potassium (K), uranium (U) et thorium (Th) caractéristiques d'une investigation géochimique. Le perfectionnement des instruments et des méthodes de traitement a permis à cette méthode d'évoluer actuellement vers une utilisation de plus en plus vaste. On est passé d'une méthode de prospection qualitative employée exclusivement pour la recherche de gisements d'uranium, dans les années soixante, à une technique quantitative à haute sensibilité applicable aussi bien à la cartographie géologique qu'à la prospection de différents types de minerais dans les milieux les plus divers.

L'application de la méthode de spectrométrie gamma aux bassins sédimentaires pour la recherche des hydrocarbures est relativement récente. En effet, la contribution de cette méthode à l'exploration des hydrocarbures n'a été véritablement envisagée que ces dernières années suite à différentes études ayant permis de démontrer que l'accumulation d'hydrocarbures en profondeur se traduit par des anomalies géochimiques mesurables en surface et qui sont souvent liées à des anomalies radiométriques (Saunders et al, 1994, El Sadek, 2002, Matolin et Stranik, 2006, Curto et al, 2012).

Dans le cadre de ce travail de mémoire de fin d'étude, nous nous sommes intéressés à la compréhension et à l'application de la méthode de spectrométrie aéroportée à la recherche d'hydrocarbures dans un contexte géologique algérien ; instaurant ainsi une première expérience en Algérie d'utilisation de cette technique pour cet objectif. La région sélectionnée pour cette étude est la zone de **GRARET L'EDDA**. Elle fait partie du bassin de Tindouf qui est une des plus grandes unités sédimentaires au monde, mais qui demeure toutefois parmi les régions les moins explorées comparativement aux autres bassins du territoire algérien. L'existence d'une large couverture aérogeophysique (spectrométrie à rayon gamma et magnétique) réalisée dès le début des années 70 dans le cadre d'un ambitieux programme pour appuyer la cartographie géologique et la recherche minière offre une opportunité inestimable

pour l'évaluation du potentiel en hydrocarbures des unités sédimentaires. L'exploitation de cette information disponible permettra de jouer un rôle déterminant comme moyen de reconnaissance et d'avant-coureurs des levés sismiques.

A la lumière de cette problématique, nous avons procédé, dans le cadre de ce mémoire, à l'accomplissement de deux tâches principales :

1) Correction des mesures de spectrométrie de Graret l'Edda des différents effets, à savoir : le temps mort, la diffusion Compton, l'atténuation de l'air, la variation de l'altitude de vol et en dernier lieu la détermination des concentrations en radioéléments pour que les valeurs mesurées aient une signification géologique directe.
2) Traitement et interprétation des données corrigées pour l'identification d'anomalies d'altération géochimique en relation avec la présence d'hydrocarbures en profondeur.

Il est actuellement établi que des micro-fuites d'hydrocarbures imperceptibles (hydrocarbon microseepage) se manifestent dans la totalité des bassins pétroliers et forment la base de la plupart des méthodes d'investigation géochimique et microbiologique. Ces micro-fuites entrainent des réactions d'oxydoréduction qui se traduisent en surface par des anomalies géochimiques très caractéristiques et dont le processus modifie les rapports proportionnels des radioéléments dans le milieu. De ce fait, l'utilisation des trois radioéléments (K, U et Th) comme indicateurs géochimiques indirectement associés à des accumulations d'hydrocarbures en profondeur a permis à la spectrométrie à rayon gamma de devenir un outil essentiel en exploration pétrolière.

Le traitement et l'analyse des mesures des trois canaux K, U et Th obtenus par le levé aérogeophysique réalisé au-dessus de la région de Graret l'Edda fait donc l'objet de ce mémoire. Ce dernier est structuré en cinq chapitres :

Le chapitre **I** présente une description du levé de spectrométrie aéroporté et des différentes caractéristiques du matériel utilisé.

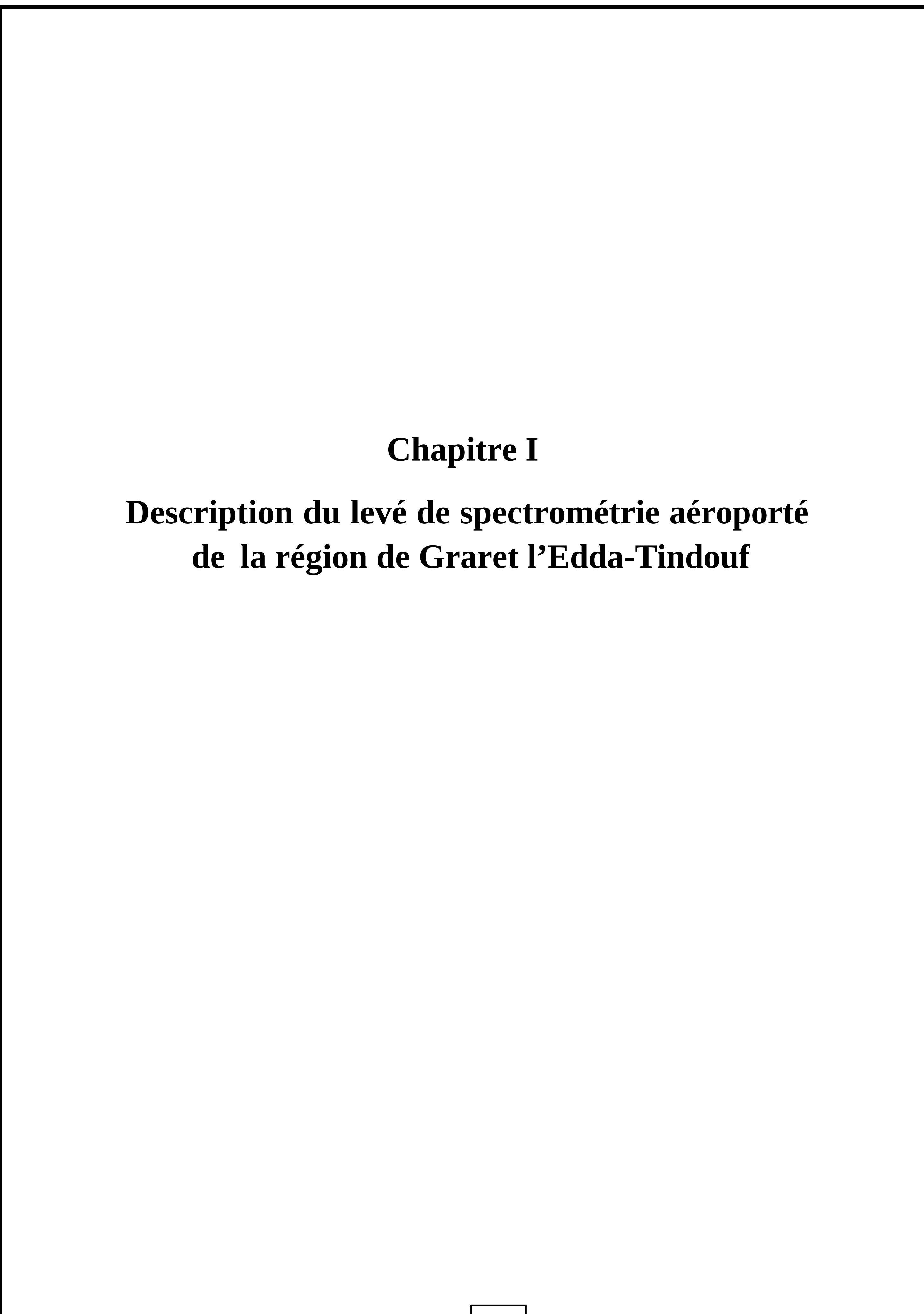
Le chapitre **II** est consacré à la présentation de la région d'étude. Sa situation géographique, la topographie et l'aspect géologique sont brièvement décrits.

Le chapitre **III** s'intéresse au développement de la méthode de spectrométrie et aux notions théoriques de la radioactivité.

Le chapitre **IV** est la plus important car elle a prend beaucoup de temps pour faire corriger les erreurs et les obstacles de traitement en essayant de trouver des solutions pour les différents problèmes trouvés pendant le traitement, pour cela plusieurs correction ont été fait (l'effet Compton, le temps mort, brui de fond, l'élévation et l'atténuation de l'air) selon un Organigramme de traitement à partir des information sur la région qui ont été utilisées.

Le chapitre **V** constitue le noyau de notre étude .le phénomène de micro fuite d'hydrocarbure est sommairement décrit, de même que l'exploration géochimique et

Ses insuffisances .le principe d'utilisation de la méthode radiométrique pour la détection indirecte des micro-fuites d'hydrocarbures est abordé en détail et une application à la région de Graret L'Edda est effectuée avec discussion des résultats obtenus.



Chapitre I

Description du levé de spectrométrie aéroporté de la région de Graret l’Edda-Tindouf

Chapitre I : Description du levé de spectrométrie aéroporté de la région de Graret l'Edda - Tindouf :

L'acquisition des données magnétiques et spectrométriques peut être effectuée aussi bien au sol qu'à bord d'un aéronef. Bien que les bases scientifiques ne changent pas dans ces deux cas. En Algérie deux levés aérogeophysique ont été réalisés dans les années (1969 et 1971-1974) couvrant le territoire Algérien par la société américaine « Aéroservice corporation » .Les travaux de cette société ont été réalisés en deux étapes :

En 1969, un levé aéromagnétique a été effectué au-dessus des bassins sédimentaires du Sahara central, et avait pour but la cartographie aéromagnétique du socle.
Entre 1971 et 1974, un levé magnéto-spectrométrique couvrait le reste du territoire national et avait pour objectif la recherche minière et la cartographie géologique régionale.

Dans notre travail nous nous intéressons au levé aérospectrométrique qui couvre la région de Graret L'Edda qui fait partie du bassin de Tindouf

I-1- Spécificités du levé de la zone d'étude :

Les survols ont été faits le long de lignes parallèles de direction Nord 160° à une altitude constante de 150m au-dessus du sol et ils sont accompagnés par des lignes de traverse de direction Nord 70°. L'espacement des lignes de travers est de 40 km, les paramètres du levé sont indiqués dans le tableau suivant (Tab I-1).

Espacement des lignes de vol	02 Km
Espacement des lignes de traverse	40 Km
Hauteur de vol par rapport au sol (Altitude)	150 m
Direction des lignes de vol	160° N
Direction des lignes de traverse	70° N
Distance entre les points d'observation	46 m

Tab I-1 : les paramètres du levé réalisé

I -2-Matériel utilisé :

Le tableau suivant (I-2) résume le matériel utilisé et leur rôles pendant l'acquisition :

Matériel	Rôle
Deux types d'avions : - DOUGLAS DC-3 - AERO COMMANDER.	utilisé dans le cas des terrains dont topographie variable. -utilise dans le cas des terrains plats.
Spectromètre à quatre (04) canaux (TC, K, U, Th).	Utilisé pour l'enregistrement des rayonnements gamma
Capteur NaI(Tl) d'un volume de 600 pouces pour le DOUGLAS DC-3 et de 800 pouces pour l'AEROCOMMANDER	Il est préférable de l'utilisé dans un Levé aéroporté à cause de son sensibilité élevée par les photons.
Altimètre radar d'une précision de 30 pieds de type HONYWELL MINEAPOLIS	Pour mesurer l'altitude de vol
Caméra à film continu de 35 mm, possédant un système de numérotage.	Enregistre un film pour prendre des photos aériens, Réalisation la carte topographique et détermination l'allure de levé
Boussole magnétique de type SPERRY CL 2, d'une résolution de 1°	Pour contrôler la direction de nord géographique.
Système de navigation : DOPPLER type ADRA-12.	Pour orienter l'avion et contrôler la distance entre les lignes de vol

Tab I-2 : Matériel utilisé et leurs caractéristiques et rôles

La figure I.1 illustre les levés aérogeophysique qui ont été réalisés entre les années (1969 et 1971-1974) couvrant le territoire Algérien

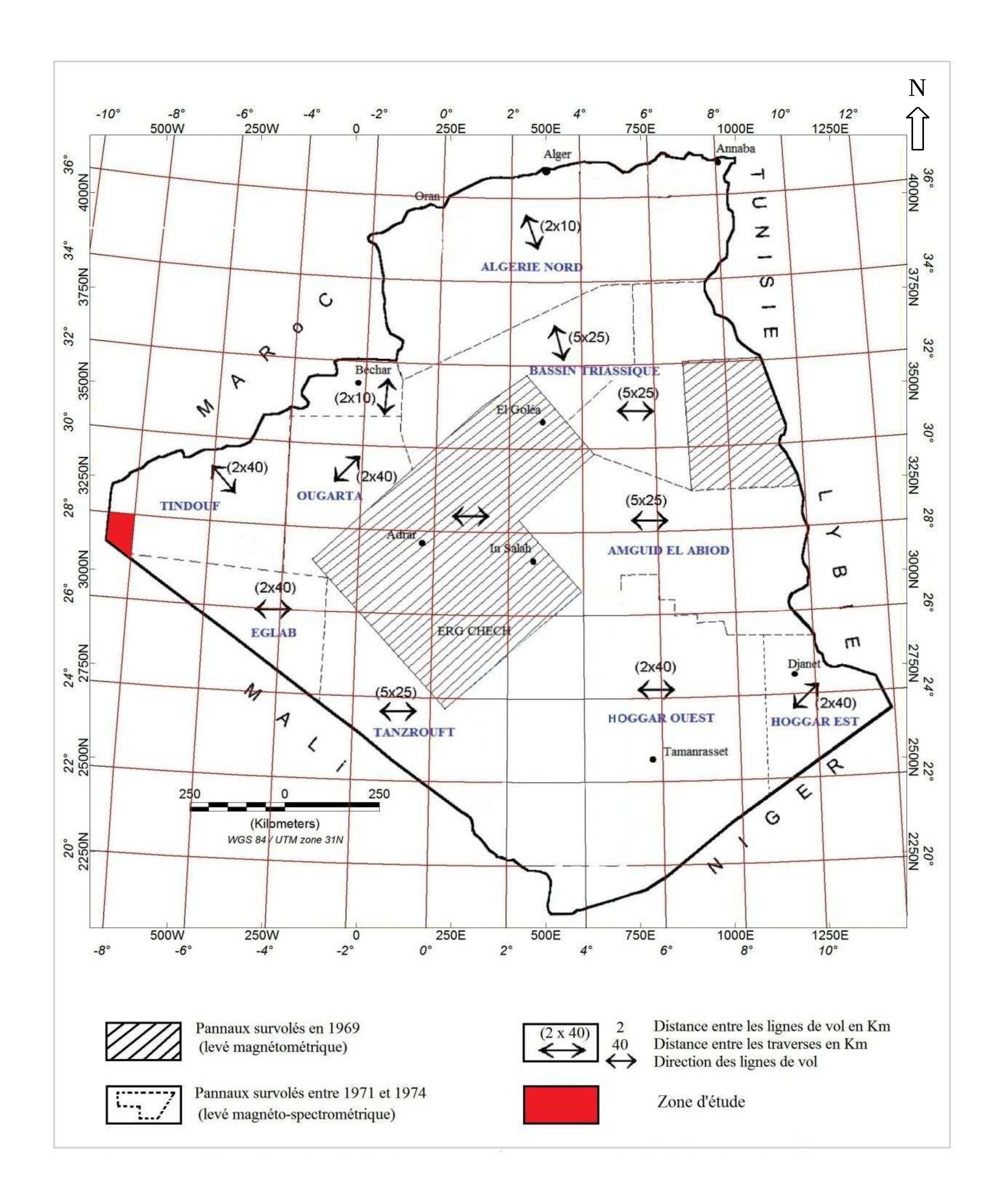


Fig I-1 : Paramètres du levé Aérogeophysique couvrant le territoire national

I-3-Levé d'acquisition :

Le levé d'acquisition qui a été fait pour notre cas contient 53 profiles en totalité : 2 lignes de bases, 3 lignes de contrôle et 48 lignes comme montre la figure I-2

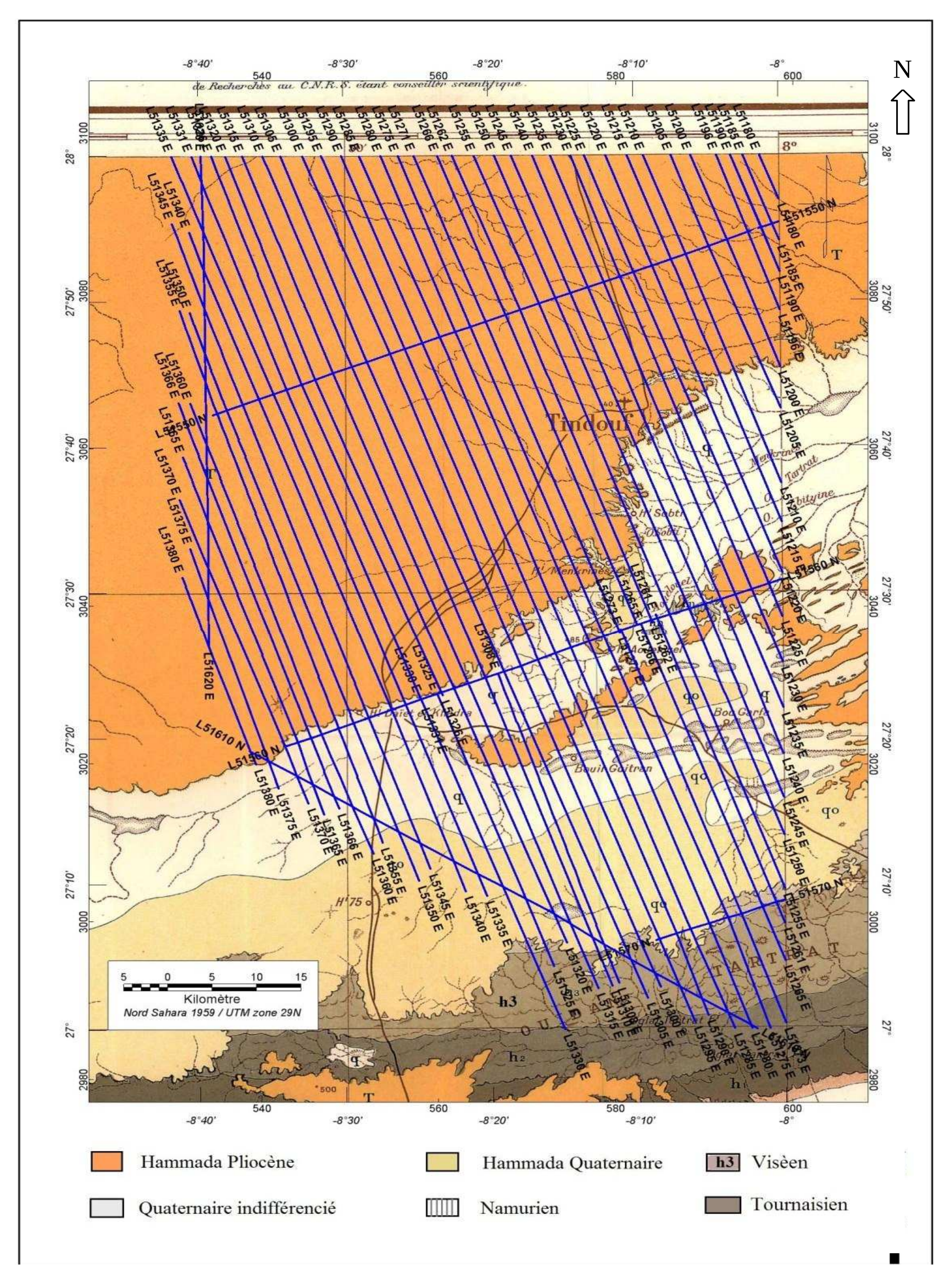
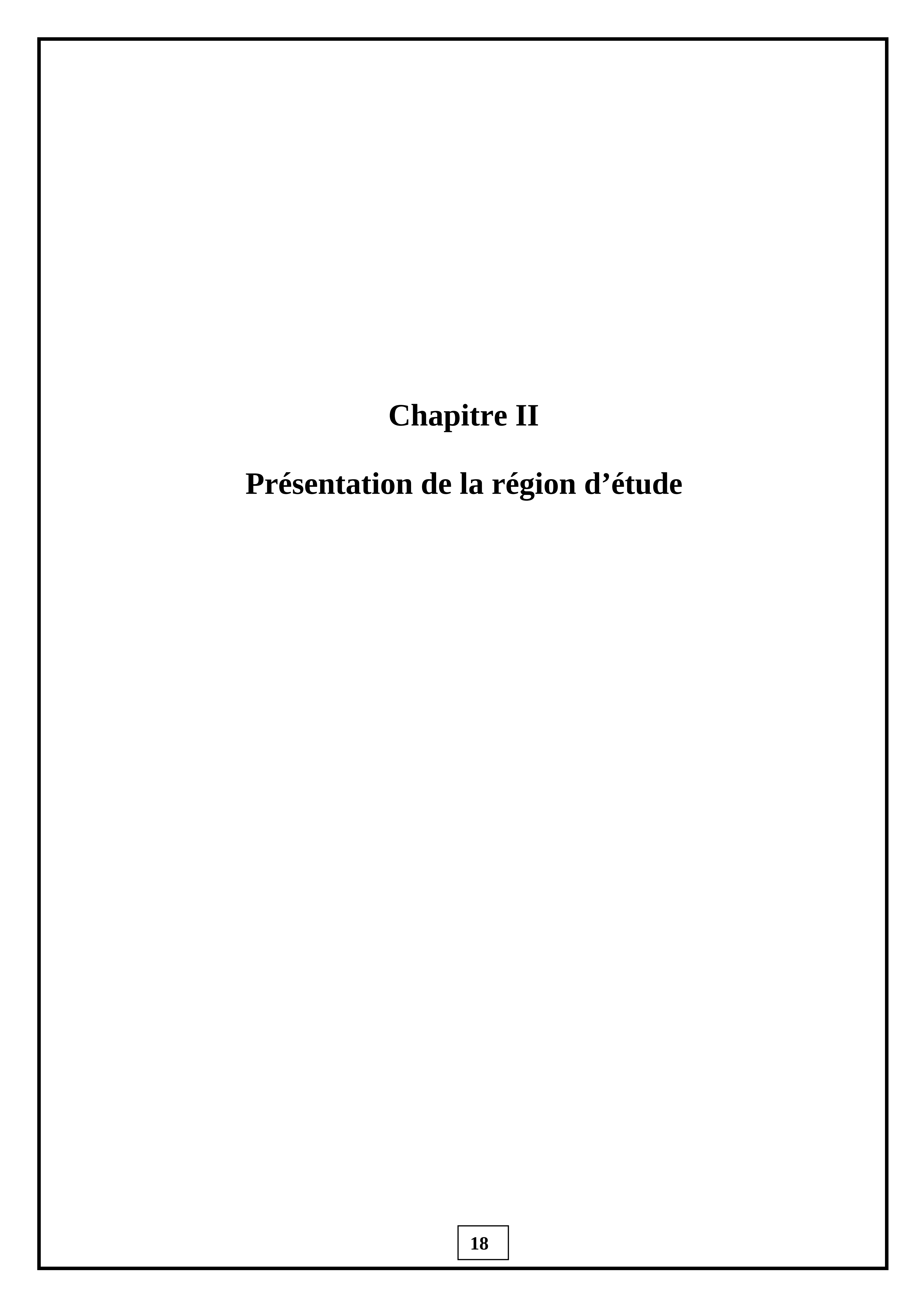


Fig I-2 : La carte géologique de la région étudiée avec superposition des lignes d'acquisition de mesures de spectrométrie gamma



Chapitre II

Présentation de la région d'étude

Chapitre II : Présentation de la région d'étude :

II-1- Situation géographique de la région d'étude :

La région de Graret l'Edda fait partie du bassin de Tindouf. Elle présente une surface de 5800 Km^2 , elle se située au Sud-Ouest de Tindouf, au Sahara occidental Algérien entre les longitudes 8°et 8°20'Ouest et les latitudes 27°et 28° Nord comme indique a la figure suivante (Fig II-1) .

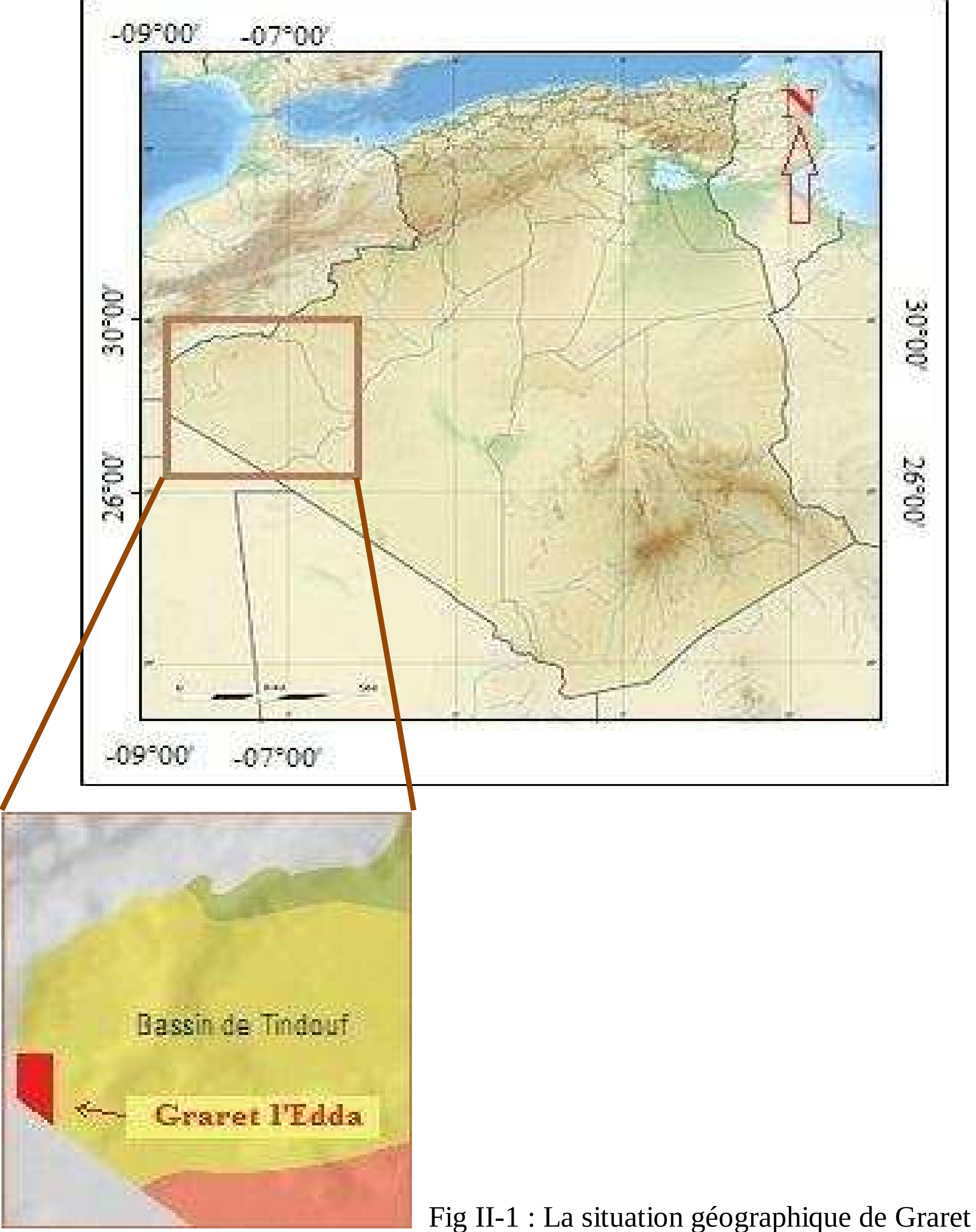


Fig II-1 : La situation géographique de Graret l'Edda par Rapport au bassin de Tindouf.

II-2- La topographie de Graret l'Edda:

Le model numérique du terrain (Fig II-2) montre que la topographie de la région étudiée varie de façon uniforme de la partie Sud - Est vers la partie Nord –West. Les partie Est et Sud -Est présentent des altitudes minimales avec des valeurs variant entre 386.5 m et 426.0 m. [mais cette partie est intercalé par des reliefs d'altitudes entre 432.5 m et 461.0m.]. Par contre les parties Ouest et Sud- Ouest de la région sont caractérisés par des altitudes moyennes dont des valeurs sont comprises entre 438.0 m et 466.5 m. Le côté Nord et Nord -Ouest ont des altitudes maximales qui atteignent 481.0m

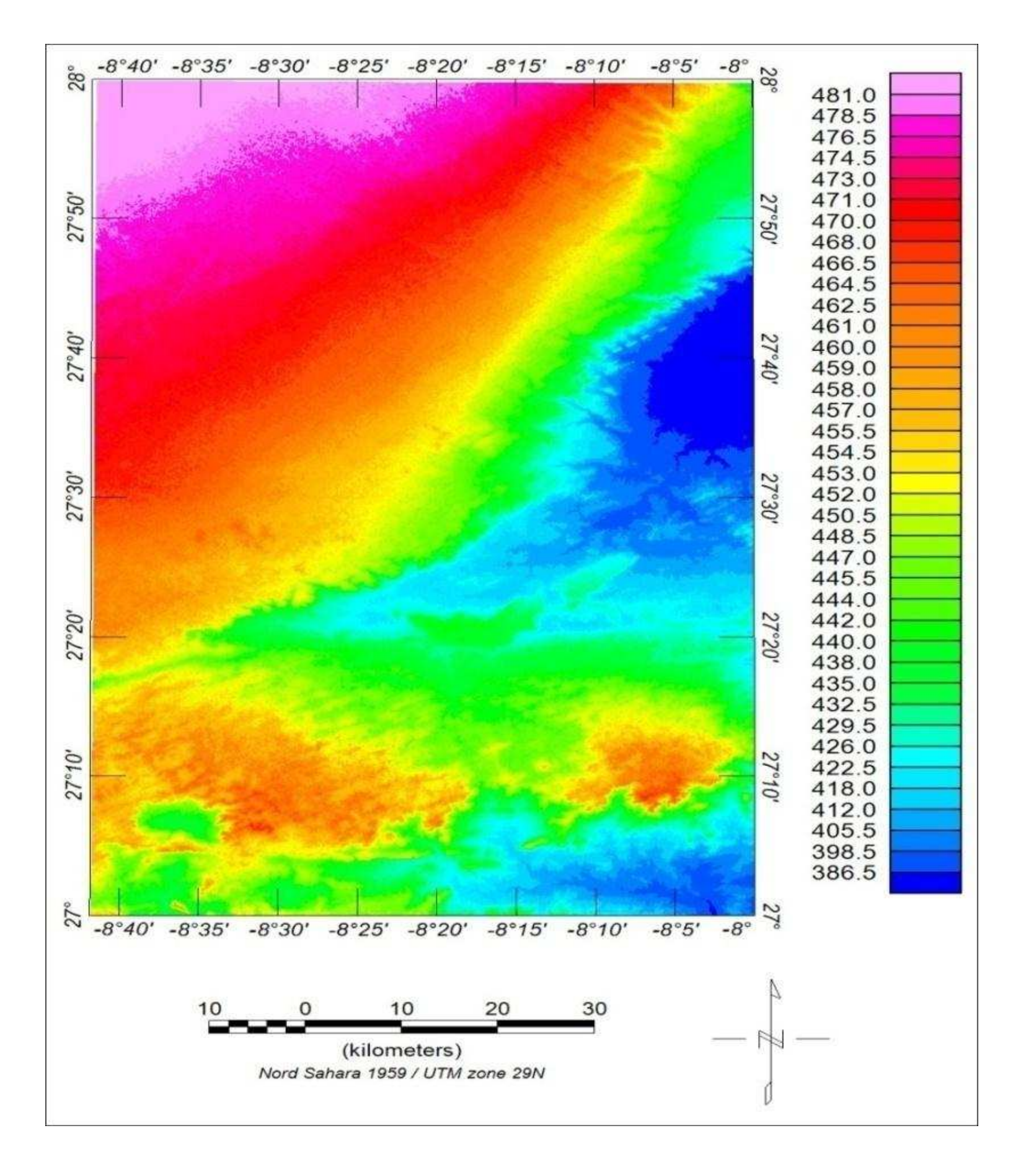


Fig II-2 : Le model numérique du terrain (MNT) de Graret l'Edda

II-3- Cadre géologique de la région d'étude :

II-3- 1 - Le socle :

Le socle pourrait être de même âge et de même nature que celui des Eglabs d'après les résultats des forages réalisés dans la région. Le socle a été traversé et reconnu par cinq puits (EAN-1, OLF, ARE-1, GSL-2 et 3) Tous ces puits sont situés dans le flanc sud du bassin de Tindouf. Il comprend selon Bessoles 1977:

- Des lambeaux d'un vieux socle archéen (gneiss, migmatite, granite)
- Des séries volcaniques (magmatisme d'Aftout) éburnéennes ou dominent des volcanites acides et des granites.
- Des séries de couverture dont l'une est grés conglomératique (série de Guelb El Hadid) et l'autre (série de Hank), argilo-gréseuse et carbonatée d'âge protérozoïque supérieure discordante sur la première.
- Des intrusions tardives sous forme de silles et dykes de roches basiques (Gabros, diorites, basaltes …).

II-3-2-Le paléozoïque :

- **Le Cambrien :**

Comme dans tout le Sahara algérien il souvent représenté par des grés quartzitiques a stratification obliques et entrecroisées et des quartzites à passées conglomératique avec des intercalations d'argiles, Il a une épaisseur de 1000m au Nord et se réduit considérablement au Sud . Ces dépôts sont rattachés au Cambrien sans confirmation paléontologique, seulement par corrélation avec les séries fossilifères du Sud du Maroc:

Le cambrien inférieur : Il est représenté de bas en haut par les formations suivantes :

a) La série des calcaires supérieurs : elle est épaisse 400m à l'Ouest et 200m dans l'Anti-Atlas oriental.

b) La série des schisto-calcaires à archaecyathidés, Brachiopodes, Trilobites et collenia d'épaisseur variant de 100m à 400m.

c) La série des schistes et grés terminaux d'épaisseur variant entre 500m et 600m. Elle comprend des intercalations des grés à tigilites et des tufs volcaniques, elle est surmontée

par un niveau d'argiles à trilolites considéré comme un terme de passage au cambrien moyen.

Le cambrien moyen : Il est représenté par une série schisteuse à paradoxides d'épaisseur variant entre 100m et 500m, les facies gréseux deviennent plus importants et les Tigilites plus nombreuses. Au Sud du bassin de Tindouf, d'après Gevin 1960 sont attribuées au cambrien les séries comprises entre le Précambrien et l'Ordovicien. C'est ainsi que « les quartzites de Djebilet » seront considérés comme cambriens. Cette série azoïque est essentiellement quartziteuse ou arkosique, elle est bien représentée au Sud de Gara Djebilet et à Aouinet legaraa où elle est formée de grés grossiers et de quartzites épais d'une quarantaine de mètres.

- **L'ordovicien :** Il se caractérise par des dépôts fluviatiles au Sud et marins au Nord et la présence de plusieurs niveaux de fer oolithique. Le cycle se termine par une glaciation. Au Nord du bassin, L'Ordovicien est représenté par un ensemble schisto-gréseux avec de très rare intercalation de calcaire.

- **Le silurien :** Il est constitué comme toute la plateforme saharienne d'une Formation argileuse grise noire à graptolithes avec des intercalations gréseuses et carbonatées reposant en discordance stratigraphique sur l'Ordovicien, l'épaisseur de la formation varie de 100 à 800m. Dans la bordure du sud du bassin, le Silurien est schisto-argileux « formation de la sebkha mahbés » son épaisseur varie de 5 à 120m et s'étend de L'andoverien moyen au pridolien (Bitem et al 1996). Dans le flanc Nord du bassin, la série argileuse s'épaissit et peut atteindre 800m, elle représentée par des argiles à graptolites avec des intercalations gréseuses, ainsi que des calcaires à Crinoïdes Orthocéres et Lamellibranches d'où un milieu marin.

- **Le Dévonien :**

a) **Le dévonien inférieur :** Au Nord du bassin de Tindouf (Deynoux 1983) distingue deux membres :

-**Un membre argileux :** (400m à l'Ouest et quelques dizaines de mètres à l'Est) Où s'intercalent des niveaux gréseux et des calcaires, ce membre et daté par des Brachiopodes, Trilopites, Tentaqulites qui indiquent un âge Lockovien.

-**Un membre Gréseux :** (700 à 800m) constitué par des barres de grés formant des crêtes (les Riches), ces grés comportent des calcaires fossilifères datés Emssien on distingue trois riches d'âge déférents : deux dans l'Emssien inférieur et un dans l'Emssien supérieur. L'Emssien est composé de Grés à passées d'argiles avec des niveaux carbonatées. Il est épais dans le domaine occidental et se réduit considérablement vers le domaine oriental. Au Sud du bassin, Le Dévonien inférieur est connue sous le nom « Formation de Gara Djebilet » il est représenté par des Grés avec des intercalations argileuses.

b) Le dévonien moyen : Au Nord du bassin, le Dévonien moyen est constitué par deux formations :

- **Une formation argilo-calcaires :** épaisse d'environ 200 à 300m

Comportant des schistes à goniatites, des grés a intercalations carbonatées formant le quatrième Riche, ce membre est daté Eifelien. Le maximum d'épaisseur a été atteint dans le puis NG-1 (366m).

- **Une formation calcaire :** constituée par un niveau carbonatée composé

De calcaires à passer d'argiles vers le sommet, l'épaisseur moyenne est de l'ordre 30 à 50m. L'âge de cette formation est attribué au Givétien.

c) Le dévonien supérieur : Au Nord du bassin de Tindouf, Le dévonien supérieur est totalement argileux, il est représenté par la série des « argiles de la plaine de Draa » et qui comprend :

- Un Frasnien : Argileux a passées calcaires.
- Un Framennien : La base est entièrement argileuse et le sommet est

Argileux également avec des intercalations gréseuses et des passée grés-calcaires l'épaisseur total de Frasnien - Framennien peut atteindre 3000m.

- **Le Carbonifère :**

Le Tournaisien : Transgressif sur le Dévonien supérieur qui se caractérise par une alternance de grés et de marnes, il montre des alternances d'argiles silteuses et de grés lardés d'intrusion doléritiques. Il couvre seulement la partie inférieure du Sud Est de notre région d'étude.

Le Véesin : renferme des argiles inter – stratifiées et de rares calcaires oolithiques et de calcaires gréseux inter-stratifiées d'argiles gréseuses et d'anhydrite surmontées par les dépôts de la Hamada. Conrad (1972) attribue la régression carbonifère du bord nord du bassin de Tindouf à la fin du Namurien et précise que la zone de passage au Namurien marin du Djebel Ouarkziz à la série continentale de la Bétaina est marquée d'un épaisode d'altération continental et d'érosion ; cette régression est en relation avec le soulèvement des monts de l'Ouguarta et de l'Anti - Atlas.

Le Namurien : est supposé dans les terrains argilo-gréseux et Laguno-lacustres N'ayant pas livré de restes organiques, il couvre la partie sud est de la zone.

II-3-3-Le Mésozoïque : Il n'existe pas d'affleurement pouvant être rattaché au secondaire sur le territoire feuilles Tindouf et Eglabs. On doit noter par contre la présence de crétacé marin à la partie extrême occidental du synclinal de Tindouf, comme la limite de cette transgression n'est pas connue.

II-3-4-Le Cénozoïque : Ce sont essentiellement les formations des :

- **Hammada :** dont l'âge va de Eocène au Pliocène. Ils sont également appelés Le « Tertiaire continental **».** Ils reposent en discordance sur différents termes du Paléozoïque et se déposent en couches horizontales largement étendues dans le bassin de Graret l'Edda et couvrent pratiquement toute la superficie de la région d'étude. La Hamada est constituée essentiellement de marnes gréseuses qui supportent une dalle calcaire d'origine lacustre (Gevin 1960). Elle ne dépasse jamais la centaine de mètres : 80m à Tindouf, 0.5 au-dessus du socle cristallin.

II-3-5-Le Quaternaire : Les formations actuelles comprennent respectivement :

- Les regs qui sont des surfaces aplanies d'origine éolienne.
- Les ergs qui sont alignements de dunes ou cordons dunaires.
- Les fedjs inter-dunaires qui sont des ergs sablo-calcaro-gypseux se développant entre les ergs.
- Les daïas qui sont des bas-fonds plats, non salins garnis généralement de limons fins.
- Les Sebkas qui constituent les bas-fonds collecteurs d'Oueds, tapissés de dépôts salins et gypseux.

- Les éboulis de piedmonts que l'on rencontre au pied de nombreux reliefs.
- Les terrasses alluvionnaires qui sont des formations plus vieilles que la plupart des autres dépôts.
- Les alluvions d'Oueds fins ou grossiers qui peuvent présenter un certains intérêt pour la prospection (Guerrak 1988).

II-3- 6- La carte géologique de la zone d'étude :

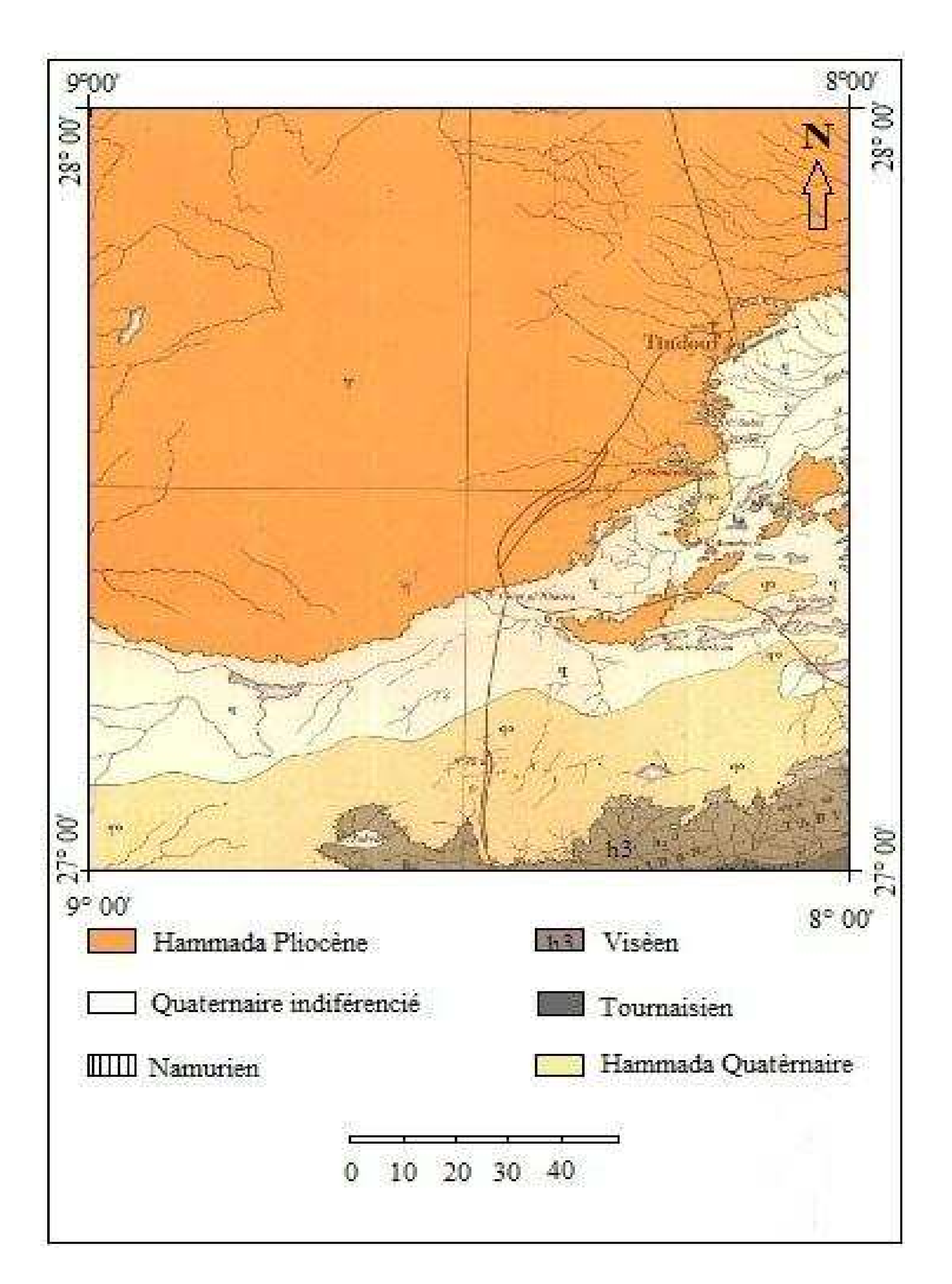


Fig II-3 : La carte géologique de Graret l'Edda-Tindouf

(1958 par le service de la carte géologique de l'Algérie Mr G - Bétrior)

II-3- 7- La colonne stratigraphique de Garaet l'Edda:

Cette colonne (Fig II-4) représente les différents dépôts des temps géologique et les données de forages :

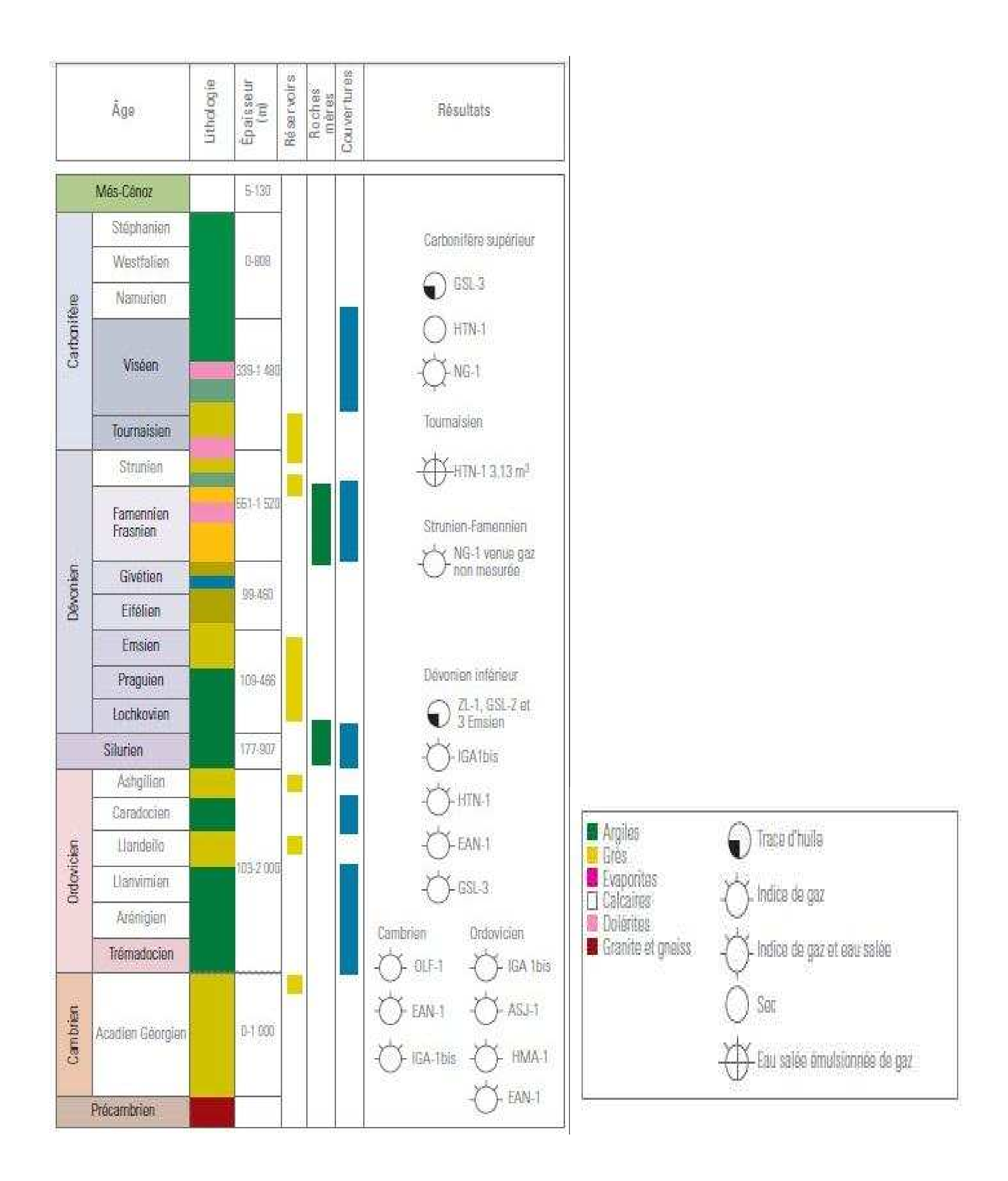


Fig II-4 : La colonne stratigraphique de la zone étudiée (Algérie WEK 2007)

II-4- L’aspect Pétrolier :

Il existe trois systèmes pétroliers où les réservoirs et roches mères sont : Ordovicien / Silurien, Emsien / Silurien et le Strunien - Tournaisien / série Argileuses du Dévonien supérieur.

a) Roche mère :

Le Silurien basal est caractérisé par une richesse moyenne à bonne, il est en fenêtre à huile au Sud au niveau du GSL-2 et en fenêtre à condensat à GSL-3. La génération d’hydrocarbure est Paléozoïque, les indices de gaz dans les puits indiquent soit un piégeage synchrone à la structuration hercynienne, soit un piégeage dans les structures anciennes.

Les autres formations argileuses du dévonien supérieur et l’Ordovicien qui sont au même stade de maturation que le Silurien dont la richesse en carbone organique est moyenne ont probablement contribué à la génération d’hydrocarbures dans ce bassin.

b) Roche Réservoir :

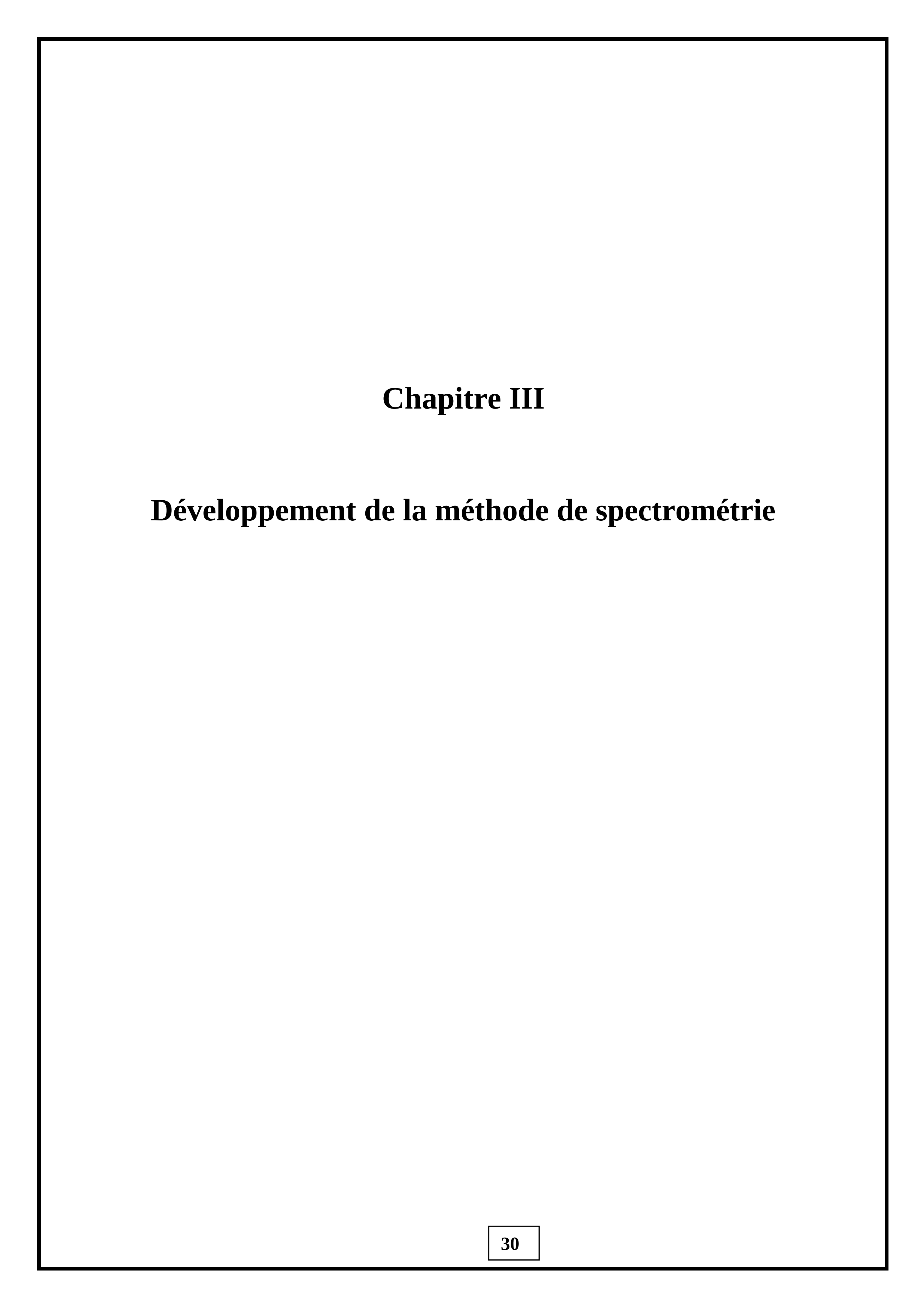
L’objectif principal est représenté par les niveaux gréseux de l’Ordovicien 1er Bani (Grés équivalent d’El Goléa) et 2ème Bani (équivalent Quartzites de Hamra). Les porosités varient de 5 à 7%. Les perméabilités sont très faibles améliorés parfois par fracturation naturelle. Les objectifs secondaires sont les Grés de l’Emsien et le Tournaisien - Strunien, Les porosités sont respectivement de 3% - 11% et de 5% - 12% bien que sont des grés fins à très fins localement quartzitiques, ils se trouvent fissurés par endroits.

Les niveaux réservoirs du Strunien - Tournaisien sont représentés par des bancs métriques composés essentiellement de grés très fins à fins, rarement moyen, localement quartzitiques, fissurés, à ciment silico - argileux et carbonaté. L’épaisseur de ces grés est de 60m en moyenne avec une porosité allant de 5 à 12%.

c) **Roches couvertures :** La couverture est assurée par :

- Pour la 1er Bani : Les argiles du Caradocien qui lui sont sus-jacentes, avec une épaisseur allant de 200m à 1200m et une bonne extension régionale.
- Pour la deuxième Bani : Les argiles du Silurien, d'une épaisseur de 100 à 800m aven une bonne extension régionale aussi
- Argile de Dévonien moyen et Supérieur.

d) **Les Pièges :** Au Nord du bassin, les pièges sont de type anticlinal et contre failles, au sud du bassin en plus de ces deux types, les biseaux stratigraphiques peuvent constituer de bons réservoirs.



Chapitre III

Développement de la méthode de spectrométrie

Chapitre III : Développement de la méthode de spectrométrie

III-1 : Généralité sur la radioactivité :

III-1-1 : Rappel :

La radioactivité est l'ajustement (Transformation) du noyau d'un atome d'un état instable vers un état stable avec émission de rayonnements ce qui peut inclure plusieurs étapes. Les isotopes sont des nucléides ayant le même numéro atomique Z, mais un nombre de masse différents. Ils possèdent le même nombre de charge (seul le nombre de neutrons diffère) et des propriétés chimiques équivalentes et occupent la même position dans le tableau de Mendeleïev. Certains isotopes sont dits stables (C, Pb, O...) mais d'autres Instables (U, Bi, Tl…) doivent devenir plus stables par une émission d'énergie radioactive. Ces isotopes instables sont appelés radio-isotopes par exemple le Cs est un isotope radioactif, un radio-isotope du césium.

Un élément radioactif qui ne possède que des isotopes radioactifs est un radioélément. Un radionucléide ou radio-isotope est un atome particulier dont le noyau se trouve à un état d'énergie déterminé. Ainsi un même radioélément peut avoir plusieurs radionucléides.

La majorité des radionucléides naturels a été formée lors de la synthèse nucléaire primordiale survenue lors de la création de l'univers. K, U, Th ont une demi-vie d'environ 5 milliards d'années, et sont par conséquent encore fortement présents dans les roches terrestres (Potassium : 2%, Uranium : 2 ppm, Thorium : 8.5 ppm). En plus des radionucléides primordiaux, leurs produits de désintégration existent naturellement, ainsi que les radio-isotopes formés par l'interaction du rayonnement cosmique avec l'atmosphère terrestre, les radionucléides cosmogéniques. En dehors des radionucléides naturels, se trouvent dans notre environnement des radionucléides artificiels crées par l'homme.

III-1-2 : Types de la radioactivité naturelle :

Une désintégration s'accompagne de l'émission d'un ou plusieurs types de Rayonnements qui sont le rayonnement alpha, le rayonnement bêta et le rayonnement Gamma.

- **Le rayonnement alpha :**

C'est une particule composée de deux protons et de deux neutrons extrêmement liés entre eux (noyau d'hélium) et animée d'une grande vitesse. L'émission alpha ne concerne que les noyaux lourds présentant un excès de protons. Le noyau fils possède donc deux protons et deux neutrons en moins. Le rayonnement alpha étant constitué d'une particule lourde, il est très peu pénétrant, une simple feuille de papier peut L'arrêter.

Exemple :

$$\mathbf{U} \longrightarrow \mathbf{Th} + \boldsymbol{\alpha}$$

- **Le rayonnement bêta :**

C'est une particule qui peut être électron (β-) ou positron (β+) animée d'une grande vitesse. Il Accompagne la transmutation d'un neutron en proton (β-) ou d'un proton en neutron (β+). L'électron ou le positron étant des particules légères, le rayonnement bêta est beaucoup plus pénétrant. Comme les particules sont chargées elles interagissent facilement avec la matière. Il faut une feuille métallique de quelques centimètres d'épaisseur pour arrêter ce rayonnement.

Exemple :

$$\mathbf{Sr} \longrightarrow \mathbf{Y} + \boldsymbol{\beta}$$

- **Le rayonnement gamma :**

L'émission d'une particule alpha ou bêta laisse habituellement le produit de filiation dans un état excité. Il existe une différence entre un noyau dans un état excité et un noyau instable. Les noyaux excités ont un excès d'énergie. Les noyaux stables et instables peuvent être dans un état stable. La désexcitation peut se faire par l'émission d'une particule (α, β, neutron ou proton) mais, dans la plupart des cas, elle se produit par l'émission d'un ou de plusieurs photons gamma. Nous utilisons le terme photon pour indiquer que le rayonnement gamma a des propriétés ressemblant à celles des particules.

Par exemple :

$$\mathbf{Co} \longrightarrow \mathbf{Ni} + \beta$$

$$\mathbf{Ni} \longrightarrow \mathbf{Ni} + \gamma$$

Les noyaux de cobalt 60 émettent une particule bêta, laissant les noyaux de nickel 60 dans un état excité. Presque immédiatement, les noyaux excités de nickel 60 émettent des rayons γ jusqu'à ce qu'ils soient tous désexcités. Puisque la durée de l'excitation est très courte, habituellement 10s, on écrit les désintégrations bêta et gamma comme s'il s'agissait d'un unique événement :

$$\mathbf{Co} \longrightarrow \mathbf{Ni} + \beta + \gamma$$

On peut écrire une équation généralisée de la désintégration gamma :

$$\mathbf{x} \longrightarrow \mathbf{y} + \gamma$$

On observera que les valeurs de *Z* et *A* ne changent pas. Puisque le rayon γ n'a ni charge ni masse (il est composé d'énergie pure), son émission ne modifie ni le numéro atomique ni le nombre de masse du nucléide. Les rayons gamma sont un rayonnement électromagnétique comme la lumière, les ondes radio ou les rayons X. Un changement dans la distribution de la charge peut provoquer l'émission d'un rayonnement électromagnétique. L'énergie des photons définit les différents types de rayonnement électromagnétique. Un photon gamma possède plus d'énergie que la plupart des photons X, lesquels sont plus énergétiques que les photons ultraviolets, et ainsi de suite jusqu'aux ondes radio les plus longues.

La figure III-1 montre le spectre électromagnétique. Les protons de basse énergie ont une fréquence peu élevée, une grande longueur d'onde et se comportent comme des ondes. Les rayons gamma de haute énergie agissent comme des particules lors de leurs interactions. La vitesse de propagation du rayonnement électromagnétique est $c = 3 \times 10^8$ m/s.

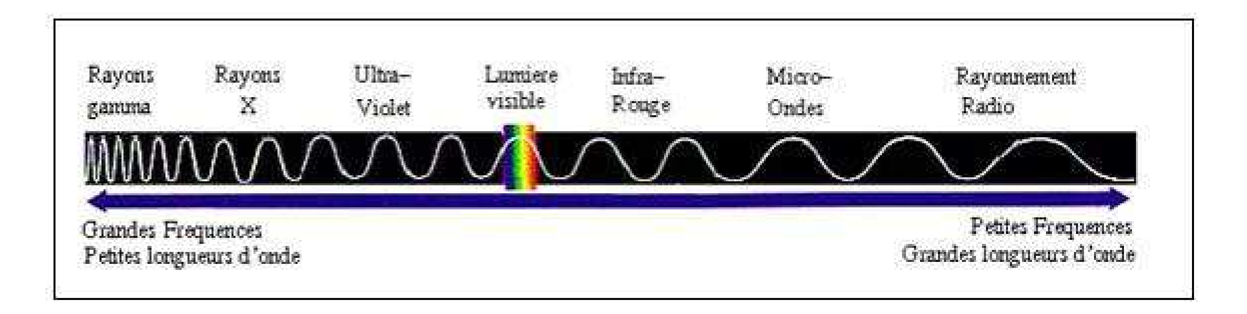


Fig III-1 : Spectre du rayonnement électromagnétique.

Les rayons gamma ont deux aspects : corpusculaire et ondulatoire

L'aspect ondulatoire :

Une des manières les plus claires de mettre en évidence la dualité onde-particule est l'expérience des fentes de Young (figure III-2). Cette expérience est connue depuis le XIXe siècle, où elle a d'abord mis clairement en évidence l'aspect purement ondulatoire de la lumière. Modifiée de manière adéquate, elle peut démontrer de manière spectaculaire la dualité onde-corpuscule non seulement de la lumière, mais aussi de tout autre objet quantique. Dans la description qui suit, il sera question de lumière et de photons mais il ne faut pas perdre de vue qu'elle est également applicable du moins en principe à toute autre particule (par exemple des électrons), et même à des atomes et à des molécules. L'expérience consiste à éclairer par une source lumineuse un écran percé de deux fentes très fines et très rapprochées. Ces deux fentes se comportent comme deux sources secondaires d'émission lumineuse. Une plaque photographique placée derrière l'écran enregistre la lumière issue des deux fentes, Ces deux sources 39 interfèrent et forment sur la plaque photographique ce que l'on appelle une figure d'interférence Cette figure est caractéristique d'un comportement ondulatoire de la lumière

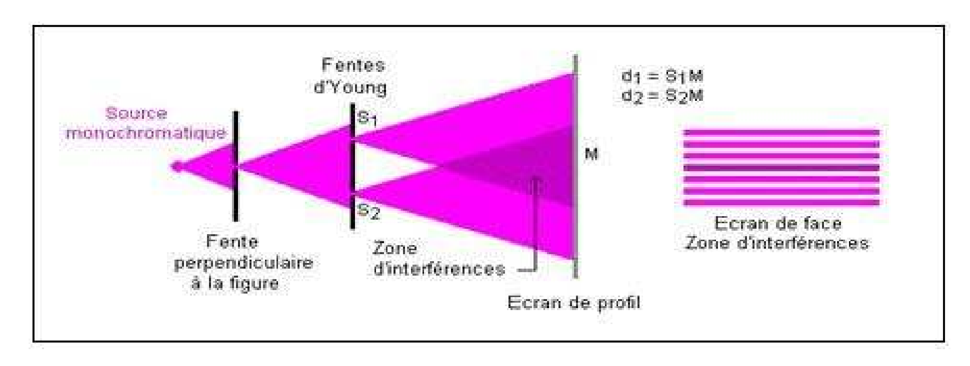


Fig III-2 : interférence entre deux sources lumineuses montre l'aspect ondulatoire de la lumière

L'aspect corpusculaire :

En 1905, Albert Einstein a réactualisé la notion corpusculaire de la lumière en introduisant la notion de photon comme étant la particule transportant l'énergie du champ électromagnétique. Puisque le photon est une particule, on peut lui attribuer une quantité de mouvement même si le photon ne possède pas de masse. Avec l'équivalence masse-énergie, on peut maintenant définir la quantité de mouvement comme étant la quantité d'énergie transportée dans un mouvement. Ainsi, la quantité de mouvement *p* associée à un photon dépend de la quantité d'énergie *E* transportée par le photon selon l'expression suivante :

$$\mathbf{P = E\gamma / C} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (III\text{-}1)$$

Où :

p : Quantité de mouvement du photon (kg ×m/s)

E_γ: Énergie électromagnétique transportée par le photon (J)

C : Vitesse de la lumière (c= $3x10^8$ m/s)

III-1 -3 : Sources du rayonnement gamma :

Les éléments radioactifs peuvent être divisés en quatre groupes principaux en Fonction de leur formation : les radionucléides naturels, leurs produits de désintégration, les radionucléides cosmiques et anthropogéniques. Les principaux radioéléments naturels ont été créés lors de la synthèse originelle de l'univers, ils incluent ^{40}K, ^{232}Th ^{238}U et ^{235}U. Leur longue période de demi-vie de l'ordre du milliard d'années. Les principales caractéristiques et ordres de grandeurs plus abondant radionucléides primordiaux sur Terre sont reportés dans le tableau III-1.

Le second groupe dérive naturellement du premier par décroissance radioactive. ^{238}U, ^{235}U et ^{232}Th sont donc les premiers radionucléides de trois séries ou chaînes de désintégration distinctes qui se terminent par un isotope stable du plomb : Pb, Pb et Pb respectivement. Certains radionucléides fils sont de puissants émetteurs gamma, un grand intérêt dans les analyses de spectrométrie gamma. Certains radionucléides possèdent plusieurs voies de décroissance, ce qui crée une chaîne multiple. Le nucléide parent décroît en proportions distinctes en deux

nucléides fils. Par exemple, 99.98 % du Pb décroît par émission α en Pb et 0.02 % en émission β^- en At.

Les rayons cosmiques sont principalement composés de neutrons et de protons qui interagissent avec les atomes présents dans l'atmosphère ou à la surface de la Terre pour produire des isotopes radioactifs, par exemple le Be ou Al. Ce phénomène induit une source de bruit de fond qui doit être estimée et corrigée lors d'une analyse des émissions gamma d'un échantillon.

Enfin, la présence de radionucléides artificiels dans notre environnement est attribuable aux retombées des expériences humaines et la propagation des déchets. Si nous négligeons les influences mineures de l'industrie, des installations de recherche et de santé, les activités des radionucléides artificiels dans l'environnement sont principalement liées aux bombardements nucléaires, aux essais de bombes nucléaires et aux incidents des centrales nucléaires. Après la première utilisation d'une bombe nucléaire sur Hiroshima le 16 Août 1945, les essais atmosphériques ont persisté de 1956 à 1963. Les retombées sont surtout composées d'I, Pu et Pu, Cs, et Sr ainsi que de radionucléides naturels tels que C ou H.

Pères	Fils	Abondance dans la croute continentale (ppm)	Demi-vie (Ans)
K	Ca	24.000	$01,25x10^9$
Rb	Sr	90	$49.00x10^9$
Th	série	8-10	$14,01x10^9$
U	série	2,7-3	$04,47x10^9$
U	série	10	$00,70x10^9$

Tab III-1 : Caractéristiques des radionucléides primordiaux les plus abondants.

III-1-4 : Les processus d'interaction gamma avec la matière :

Les photons γ sont des particules neutres, ne peuvent être détectés que s'ils interagissent avec la matière d'un détecteur en cédant tout ou partie de leur énergie à un ou plusieurs électrons du milieu. Le type d'interaction dépend du matériau traversé

et de l'énergie du photon incident. Il peut se produire trois processus d'interaction dont l'occurrence est régie par des lois statistiques :

L'effet photoélectrique :

En 1886, le physicien allemand Heinrich Rudolf Hertz réalisa expérimentalement qu'un matériau métallique exposé à la lumière pouvait émettre des électrons. Cette découverte fut baptisée au nom de l'effet photoélectrique (figure III-3). Malheureusement, Hertz ne fut pas en mesure d'expliquer théoriquement le phénomène car certaines caractéristiques de cet effet ne fonctionnaient pas avec la théorie classique de l'électromagnétisme de l'époque.

Un électron lié à une structure possède une énergie potentielle électrique Ue négative et la somme de son énergie cinétique et de son énergie potentielle électrique est également négative (K +Ue < 0). Pour éjecter des électrons de la structure, il faut fournir beaucoup d'énergie aux électrons. Dans ce phénomène, l'énergie acquise par les électrons provient du champ électromagnétique de la lumière.

Après absorption de la lumière, le gain d'énergie de l'électron se transforme en énergie cinétique et l'électron se déplace plus rapidement. Il peut ainsi s'éloigner de la structure en augmentant son énergie potentielle ce qui réduit son énergie cinétique. L'électron sera éjecté si son énergie totale (après le travail *W* de la lumière) est supérieure à zéro (éjection d'un électron si : Ki+Uei +W > 0).

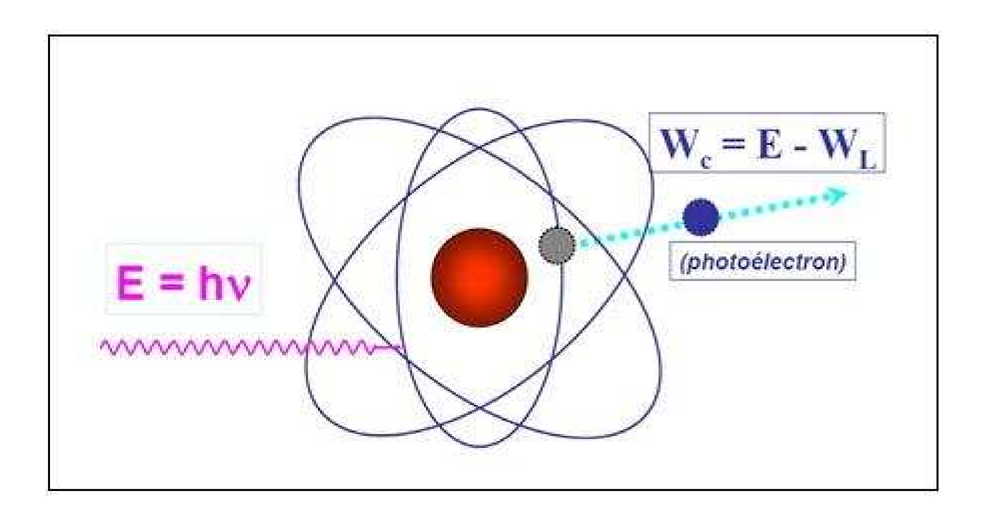


Fig III-3 : L'effet photoélectrique

L'effet Compton :

Le comportement corpusculaire du photon et l'hypothèse de la quantification de l'énergie du photon par la longueur d'onde furent vérifiés expérimentalement en 1923 par Arthur Holly Compton pour l'observation de la diffusion du photon sur un électron (figure III-4). Cette expérience appelée « effet Compton » met en lien le transfert d'énergie d'un photon lorsqu'il entre en collision avec un électron libre (ou très faiblement lié à un atome). La perte d'énergie se résulte en une augmentation de la longueur d'onde du photon (diminution de la fréquence). Compton fut récompensé par le prix Nobel de physique en 1927 pour cette découverte.

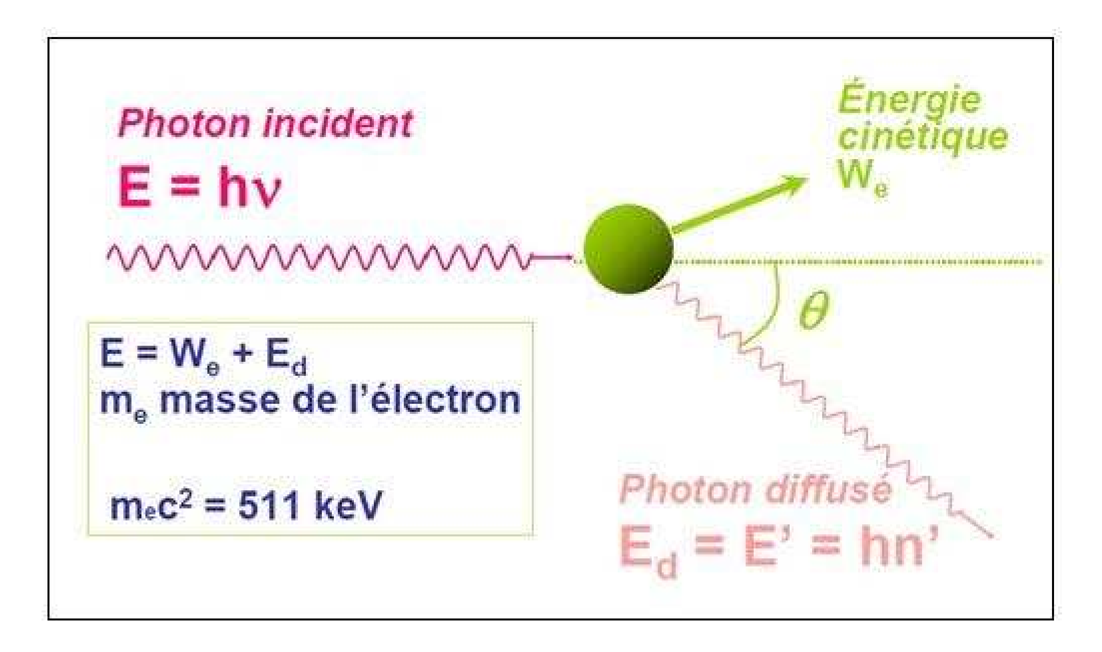


Fig III-4 : L'effet Compton

L'expérience démontre qu'il y aura déviation de la trajectoire d'un photon d'un angle θ en fonction de la variation de la longueur d'onde l entre le photon avant et après la collision :

$$\lambda_f - \lambda_i = (1-\cos\theta)\, h/m_e c \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (III-2)$$

Où :

λ_f : Longueur d'onde initiale du photon (m)

λ_i : Longueur d'onde finale du photon (m)

θ : Angle de déviation du photon initial. h

: Constante de Planck (6,63 x10^{34} J.s) me

: Masse de l'électron (9,11x 10^{-31} kg) C

: Vitesse de la lumière (c=3x10^8 m/s)

La production de paires électron-positron :

Cette interaction d'un rayon gamma se produit toujours près d'un noyau atomique qui « recule » (il absorbe une partie de la quantité de mouvement). L'énergie du rayon gamma sert à créer une paire électron-positron. (Un positron est un électron porteur d'une charge positive, on écrit parfois positon.) Pour créer une paire, le photon doit avoir une énergie d'au moins 1,02 MeV, soit l'énergie équivalente à la masse de deux électrons. Ce mécanisme se produit fréquemment pour les rayons gamma très énergétiques (figure III-5).

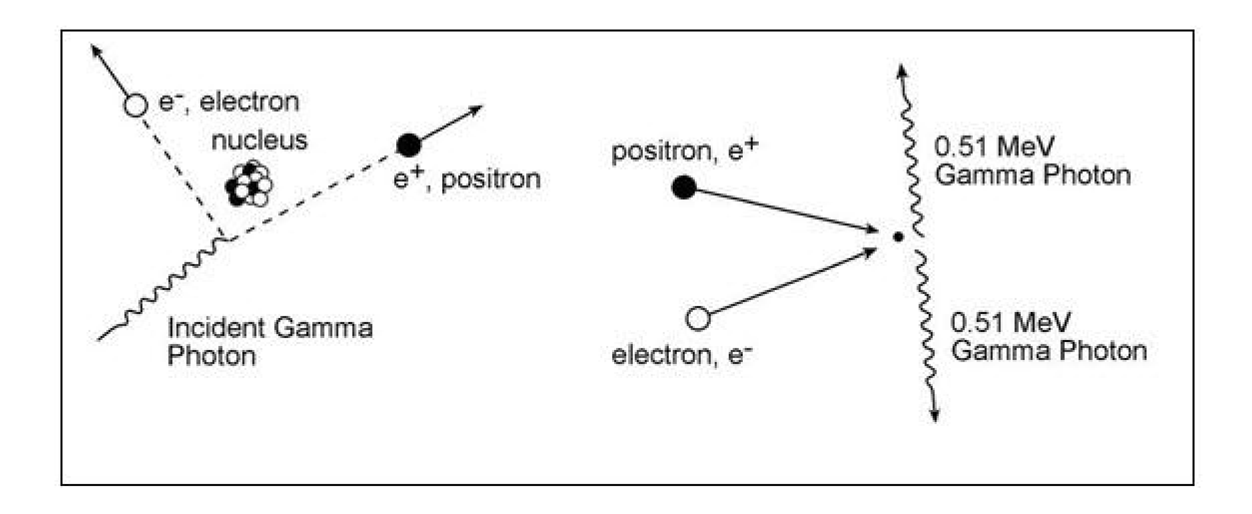


Fig III-5 : production de paires électron-positron

III-2 : Principe de la spectrométrie :

La spectrométrie gamma est une technique très utilisée pour identifier des éléments radioactifs par la mesure de l'énergie des rayonnements gamma émis, à l'opposé de la technique utilisant un compteur Geiger qui lui ne détecte que la présence de rayonnement gamma sans pouvoir fournir une information sur la nature de la source détectée. Les mesures par spectrométrie gamma permettent de construire des spectres (Histogrammes donnant la population de photons détectés en fonction de leur énergie).

Les énergies de rayon gamma qui sont les produits de la décomposition radioactive sont caractéristiques du nucléide en désintégration. La spectrométrie gamma consiste à prendre des mesures de certaines parties distinctes du spectre de ces énergies afin de déterminer les concentrations de chaque radioélément (le Potassium 40, l'Uranium 238 et le Thorium 232) et de cartographier les roches suivant leur signature spectrale.

Le potassium est un des principaux éléments constitutifs des roches. Il est le principal élément d'altération dans la plupart des gisements de minerai. L'Uranium et le Thorium sont présents en quantité à l'état de trace, ce sont des éléments mobiles et immobiles respectivement.

Il y a de nombreux éléments radioactifs naturels. Cependant, il n'y a que les trois éléments cités précédemment qui ont des isotopes émettant de la radiation gamma d'une intensité suffisante d'un tel degré qu'il permet de la mesurer par le spectromètre du levé aéroporté.

Pour la plupart des spectromètres aéroportés modernes, le spectre naturel des rayons Gamma sur la gamme de 0 à plus ou moins 3000keV est résolu en 256 canaux, chaque canal allant de 10 à 12.5keV en largeur. Pour la plupart des levés, et surtout pour la cartographie des radioéléments naturels, une sommation est faite des comptages pour des groupes des canaux, ce qui donne les fenêtres présentées dans la figure ci-dessous (III-6). Chaque fenêtre est particulièrement sensible aux énergies associées avec une série de désintégration soit celle du potassium, soit celle du thorium, soit celle de l'uranium. Nous représentons dans le tableau ci-après la fenêtre spectrale standard (tableau III-2).

Nom de la Fenêtre	**Energie Minimum (keV)**	**Energie Maximum (keV)**	**Pic majeur (keV)**	**Radionucléide**
Potassium	1370	1570	1460	K
Uranium	1660	1860	1760	Bi
Thorium	2410	2810	2615	Ti
Comptage Total	410	2810	______	______
cosmique	3000	infini	______	______

Tab III-2 : La fenêtre standard pour des radioéléments naturels

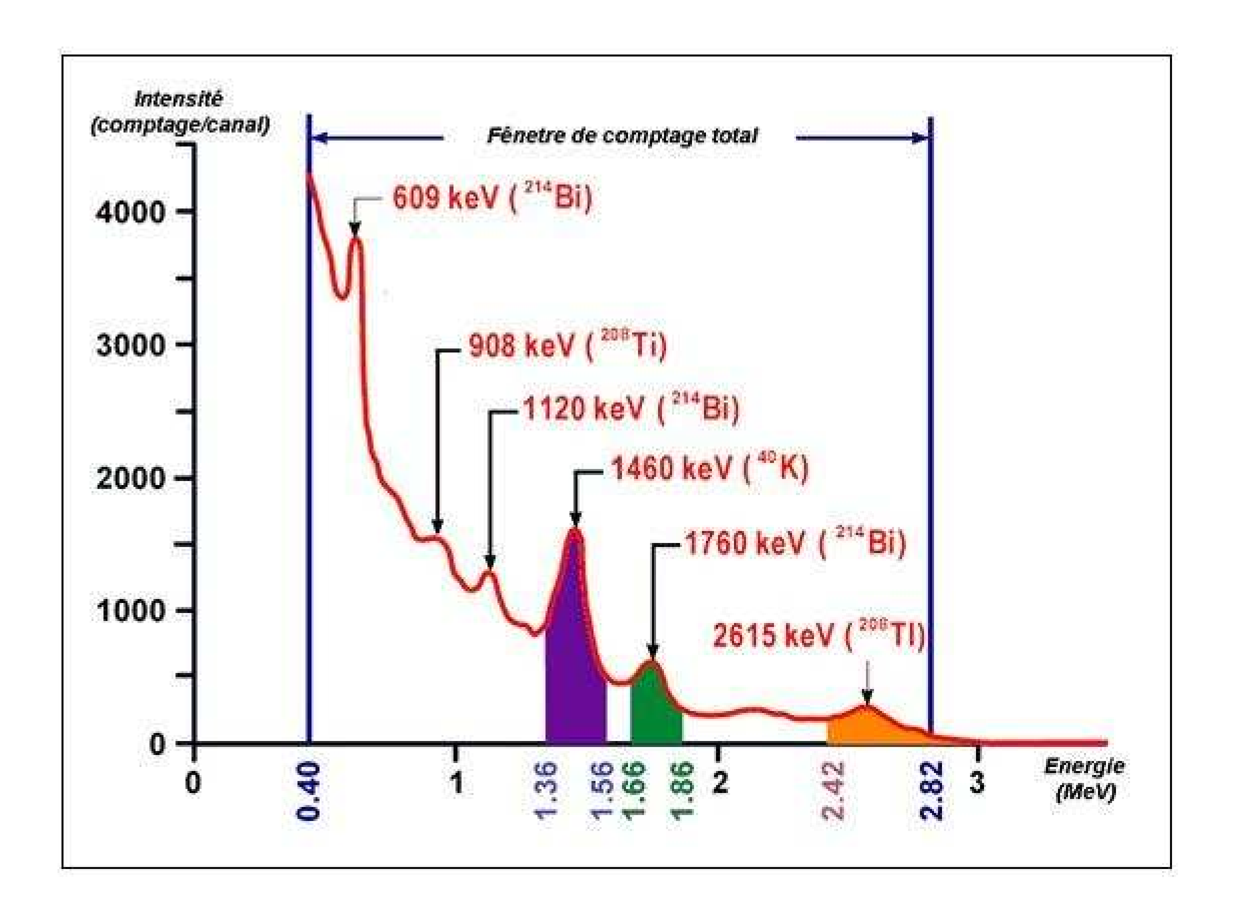


Fig III-6: Spectre typique des rayons gamma présentant les pics des rayons gamma de Tous les trois radioéléments avec la fenêtre d'énergie pour détecter les trois Radioéléments.

III-3 : l'instrument de mesure :

Les détecteurs du rayonnement gamma enregistrent l'interaction d'un photon γ sur les atomes du réseau cristallin du détecteur, la transmet pour la comptabiliser aussi vite que possible, afin de retrouver son état initial.

III-3-1 Principe du fonctionnement :

Lorsqu'un photon γ interfère avec le détecteur, il est immédiatement transmis et enregistré selon son énergie dans le spectre, entre 0 et 3 MeV. De cette façon, l'énergie de chaque émission gamma est spécifique du radionucléide qui s'est désintégré, mais la qualité variable des détecteurs affecte la discrimination des énergies.

Le nombre d’émissions enregistré est représenté par l’amplitude du pulse à cette énergie (hauteur du pic), il correspond au nombre de photons gamma reçus sur un laps de temps, il permet donc de mesurer l’activité. Si l’activité du radionucléide-source est élevée, beaucoup d’émissions gamma sont susceptibles d’interagir et peuvent surpasser la capacité du détecteur à les transmettre puis les enregistrer toutes. Dans ce cas, le nombre de rayons gamma effectivement enregistrés sous-estime le nombre de photons γ réellement émis par la source. La qualité d’un détecteur est donc liée à son potentiel d’acquisition des fortes activités, en même temps que sa capacité à revenir à son état initial (le« temps-mort » la durée pendant laquelle le système n’enregistre rien).

III-3-2 Types de détecteurs du rayonnement gamma :

Les détecteurs utilisés en spectrométrie gamma aéroportée ou pédestre sont basés sur deux techniques différentes : les cristaux à scintillation et les semi-conducteurs.

Le premier système (cristal d’iodure de sodium, scintillation) procure de larges pics utiles pour évaluer l’amplitude de l’activité totale et pour localiser les sources les plus radioactives.

Le second système (cristal de germanium, semi-conducteur) a une meilleure résolution en énergie qui permet de séparer et d’identifier précisément les émissions provenant de tous les radioéléments présents dans la source.

L’efficacité du système et sa capacité à restituer fidèlement le signal reçu dépend de la résolution, de la taille du cristal et du temps d’acquisition. En milieu naturel, les activités sont souvent assez faibles et l’efficacité du détecteur devient cruciale et joue sur la durée d’acquisition nécessaire, en fonction de sa taille et de son type : 1 seconde pour un NaI aéroporté (50 L), 5 à 10 minutes pour un NaI portable (0,3 L), une heure pour un détecteur en Germanium portable (0,3 L).

Remarque : Dans notre travail c’est le détecteur à scintillation qui a été employé

Détecteurs à scintillation :

Les atomes du détecteur sont excités par le rayonnement gamma et émettent une quantité de photons équivalente par scintillation. La lumière proche du visible frappe une surface photosensible pour produire autant de photoélectrons. Ce pulse électronique secondaire est ensuite multiplié puis enregistré selon son énergie.

La fréquence et l'amplitude du pulse électronique sont reliées au nombre (comptage par seconde - cps) de rayons gamma et à leurs niveaux d'énergie respectifs (de 1 keV à 3 MeV).

Dans les détecteurs à scintillation, le matériau sensible aux rayons gamma est un cristal artificiel, les plus communs étant composés d'iodure de sodium (NaI). Les interactions avec le réseau cristallin excitent les électrons qui atteignent un niveau d'énergie donné. Ces électrons reviennent à un état stable par l'émission d'un photon. Certaines impuretés (Thallium) sont ajoutées dans le réseau cristallin (le cristal est dit « enrichi ») pour augmenter la capacité d'émission de photons, comme montre la figure suivante :

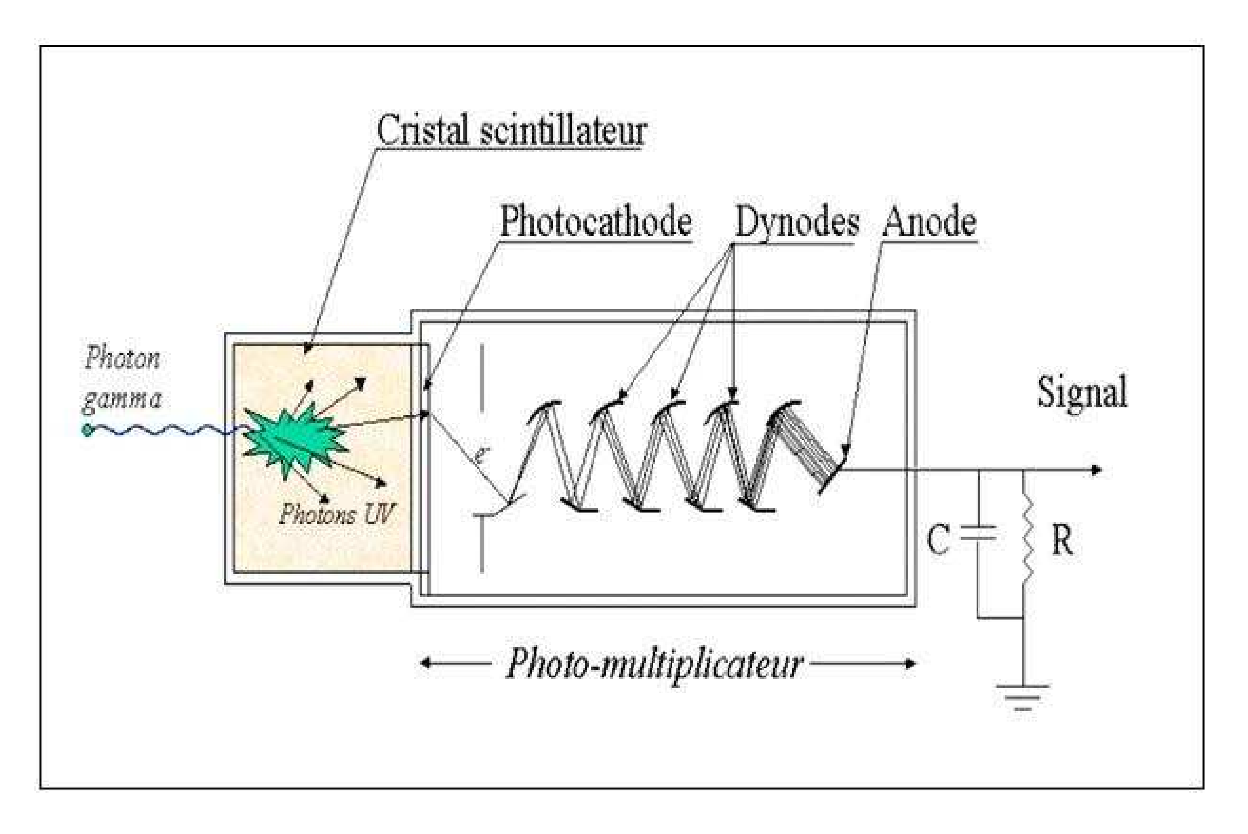
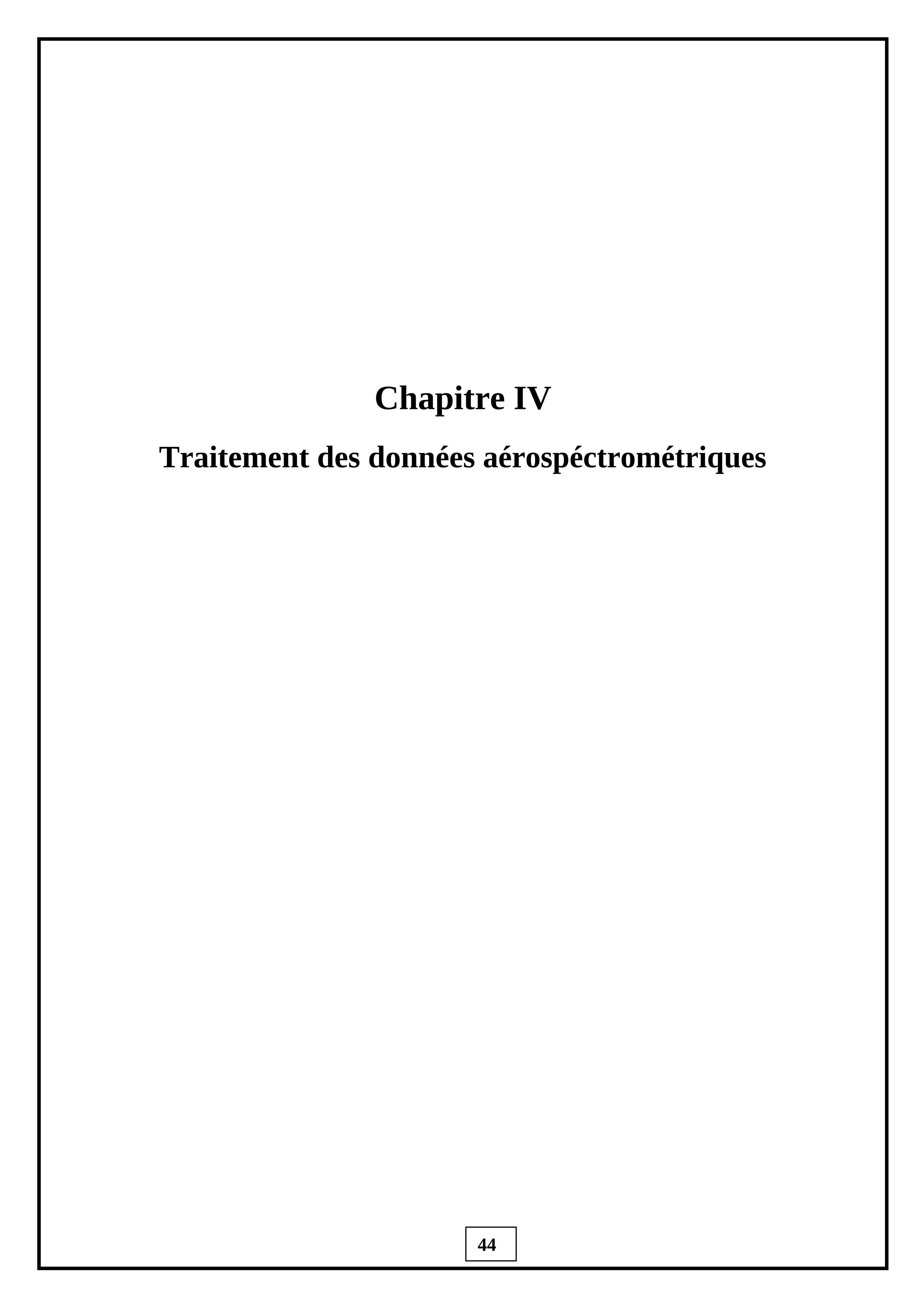


Fig III-7 : Principe de base d'un détecteur à scintillation.



Chapitre IV

Traitement des données aérospéctrométriques

Chapitre IV : Traitement des données aérospectrométriques :

Le rayonnement gamma peut provenir de plusieurs sources (radonique, haute Atmosphère et géologie), Seules celles d’origine géologique nous intéressent dans ce travail. Alors, le but du traitement des données spectrométriques est d’éliminer toutes les sources qui ne sont pas liées à la géologie et de traduire les spectres observés en concentration des radioéléments (K, U, Th).

Après avoir traitées les données en enlevant les sources non géologiques, Les données corrigées sont converties en valeurs de concentration terrestre de potassium, d’uranium et de thorium. Comme les fenêtres U et Th mesurent respectivement ses Produits de filiation Bi et Ti, Les concentrations en uranium et thorium sont exprimées en équivalent uranium éU et équivalent thorium éTh. La procédure du traitement des spectres bruts suit une liste de corrections détaillée ci-après :

IV-I- L’organigramme de traitement :

À l’aide de logiciel Oasis montage qui a été développé par GEOSOFT nous avons traité les données spectrométriques selon l’organigramme suivant (Fig IV-1) :

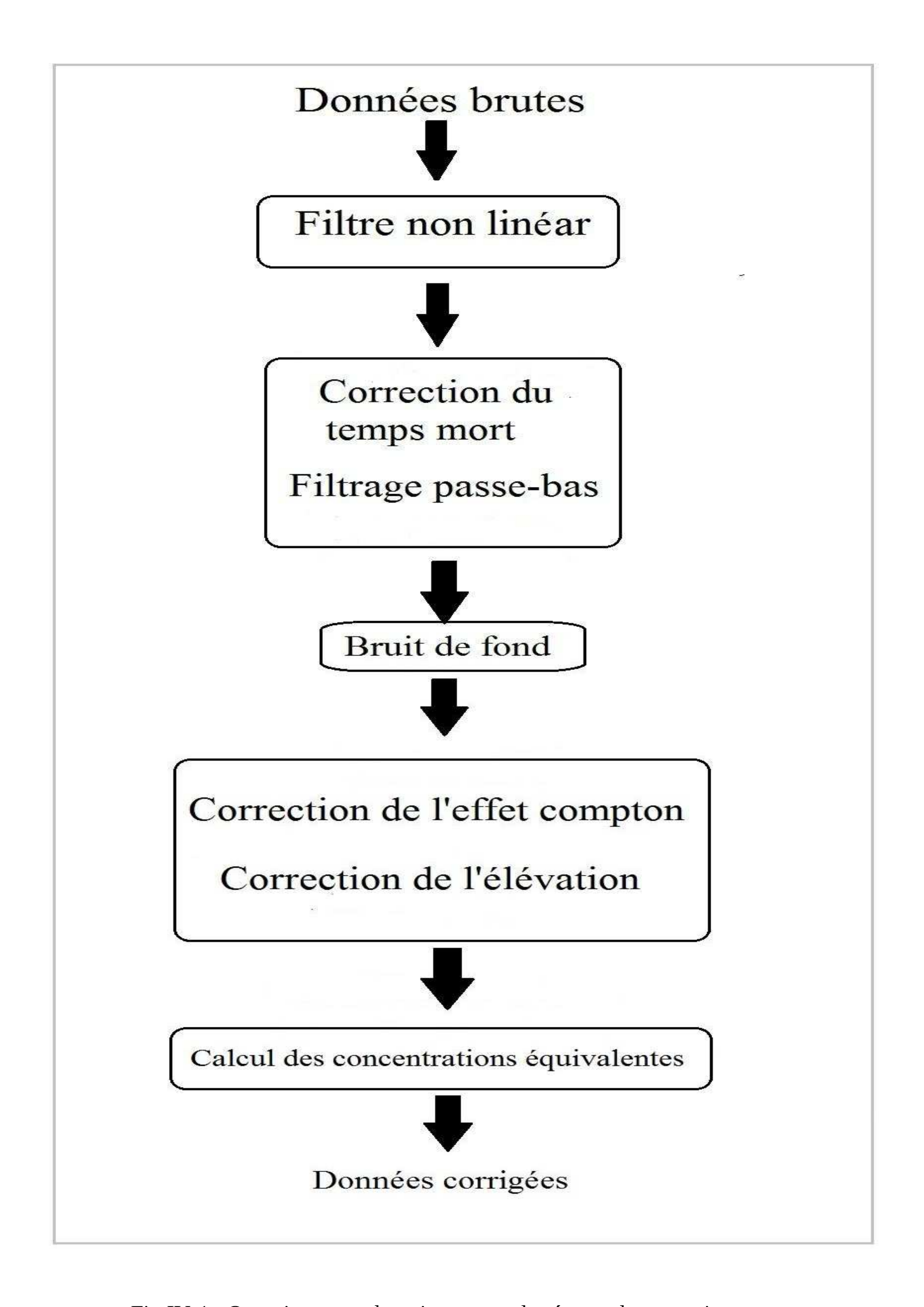


Fig IV-1 : Organigramme de traitement et les étapes de correction

IV-I-1 Correction du temps mort :

Les mesures spectrométriques aéroportées sont généralement enregistrées chaque seconde (en unité cps). Pour le traitement de chaque impulsion provenant du détecteur, l'instrument nécessite un certain intervalle de temps. Durant ce laps de temps les autres impulsions qui arrivent sont automatiquement rejetées, ce temps est appelé (temps mort du l'équipement).

Les systèmes de mesures actuels permettent d'enregistrer le temps durant lequel le détecteur est (on) appelé live time (temps d'échantillonnage moins le temps mort).
Le temps morts caractéristique des équipements est de l'ordre de 5- 15us/impulsion.
Il peut être corrigé en utilisant l'expression suivant :

$$\mathbf{N = n / (1-Ct)} \quad \text{.................................(IV-1)}$$

Où :

N : taux de comptage corrigé (coups/sec)

n : taux de comptage observé (coups /sec)

C : comptage total (coups/sec)

t : temps mort de l'équipement par impulsion

IV-I-2 -Correction du bruit de fond :

Le rayonnement provenant de sources perturbatrices comme le rayonnement cosmique, le flux de radon atmosphérique ou le rayonnement intrinsèque de l'appareillage produit une quantité de rayonnement gamma supplémentaire qu'il faut retranché appelée bruit de fond. L'importance du bruit de fond dépend du matériel, de l'altitude et des conditions météorologiques.

La procédure de calibration du bruit de fond permet d'estimer cette composante qu'il faudra retrancher aux mesures. Les formules utilisées pour éliminer le bruit de fond sont :

$$\mathbf{TC_{corr} = TC_{obs} - BF_{TC}} \quad \text{..................... (IV-2)}$$

$$\mathbf{U_{corr} = U_{obs} - BF_{U}} \quad \text{.......................... (IV-3)}$$

$$\mathbf{K_{corr} = K_{obs} - BF_{K}} \quad \text{.......................... (IV-4)}$$

$$\mathbf{Th_{corr} = Th_{obs} - BF_{Th}} \quad \text{...................... (IV-5)}$$

Où:

TC_{corr}, K_{corr}, U_{corr} et Th_{corr} : les valeurs corrigées des quatre canaux.

TC_{obs}, K_{obs}, U_{obs} et Th_{obs} : les valeurs brutes des quatre canaux.

BF_{TC}, BF_K, BF_U et BF_{Th} : les valeurs des bruits de fond des quatre canaux.

IV-I -3- Correction de l'effet Compton :

L'effet Compton est une perturbation qui varie en fonction de l'énergie et due aux interférences des émissions gamma dans les régions d'intérêt sélectionnées pour les comptages des activités en potassium, uranium et thorium. Chaque émission gamma génère une quantité d'émissions supplémentaires, étalées sur le spectre vers les basses énergies, qui provoquent des comptages parasites dans les fenêtres voisines.

La correction de l'effet Compton consiste à soustraire ces comptages en excès au moyen de coefficients appelés rapports d'enlèvement, et notés a, b et g (vers les énergies ascendantes) ou α, β et γ (vers les énergies décroissantes) comme illustré sur la figure avec les flèches (Fig IV-2). Les six coefficients constants sont spécifiques d'une session de mesure, et sont déduits des mesures séparées de sources pures de potassium, d'uranium ou de thorium. Lorsque le détecteur enregistre les émissions gamma d'une source pure d'uranium par exemple, en plus des comptages de la région d'intérêt typique de l'uranium, une quantité donnée d'émissions gamma supplémentaires est enregistrée dans les régions Th et K les interférences entre les fenêtres sont particulièrement traquées lorsque les activités naturelles sont basses et les comptages faibles.

Pour réaliser cette correction on utilise les formules suivantes :

$$N_{Th(corr)} = (N_{Th} - a^* N_U) / (1-a^*\alpha) \quad \text{............(IV-6)}$$

$$N_{U(corr)} = (N_U - \alpha\, N_{Th(corr)}) / (1-a^*\alpha) \quad \text{........(IV-7)}$$

$$N_{K(corr)} = N_K - \beta\, N_{Th(corr)} - \gamma\, N_{U(corr)} \quad \text{.......(IV-8)}$$

Ou :

K_{corr}, U_{corr} : les valeurs corrigées de K et U.

α, β et γ : les coefficients de stripage, caractérisent le taux d'influence du spectre d'un élément dans le canal d'un autre élément.

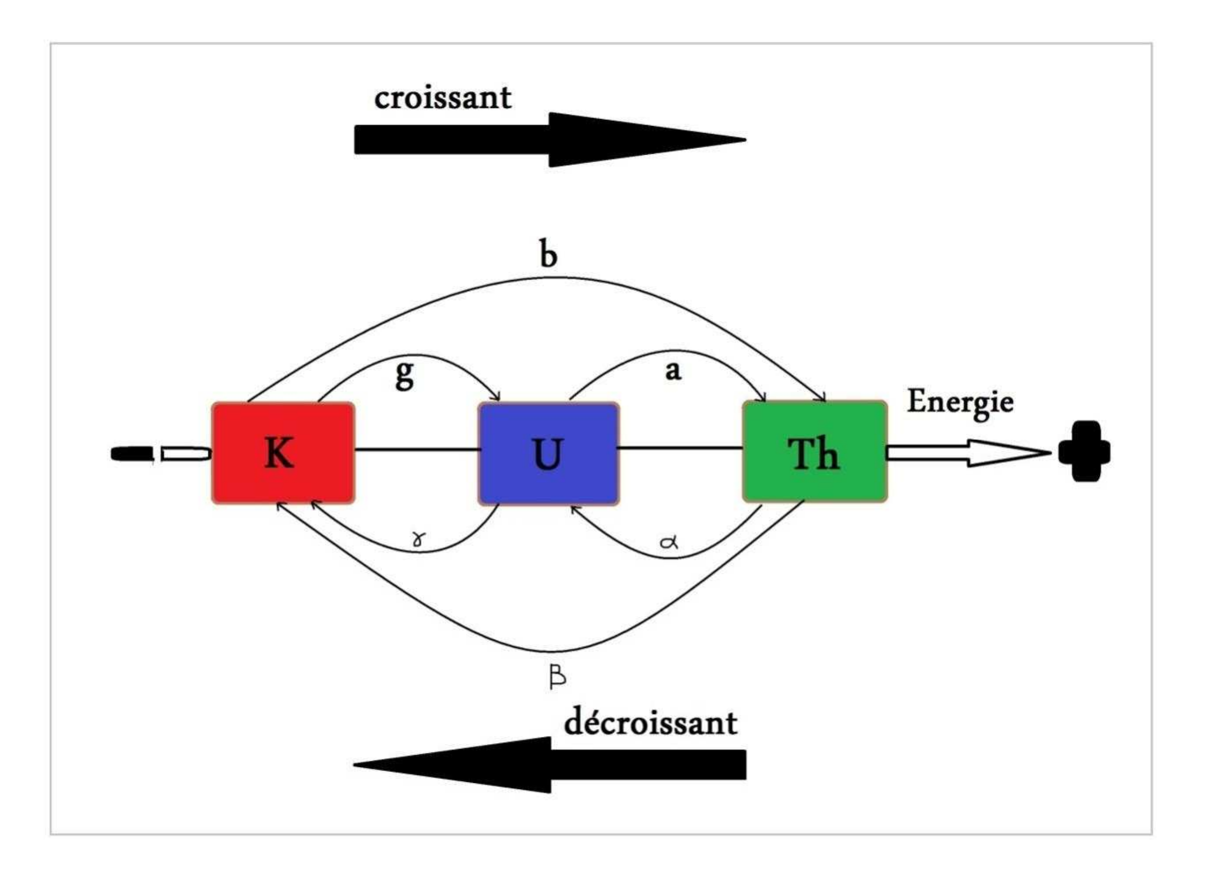


Fig IV-2 : La contribution relative des émissions gamma dans les fenêtres voisines. Pour les rapports de suppression (stripping ratios) descendants, α est la contribution de la source Th dans la fenêtre U, β dans la fenêtre K et γ de la source U dans la fenêtre K. Pour les rapports de suppression ascendants, g est la contribution de la source K dans la fenêtre U, b dans la fenêtre Th et a de la source U dans la fenêtre Th.

IV-I-4- Correction d'élévation :

L'intensité du signal radiométrique dans un levé aéroporté diminue exponentiellement avec l'augmentation de l'altitude entre le sol et l'appareil. Ceci est dû à l'absorption de la radiation gamma par l'air ambiant, la température et la pression de l'air ont également une certaine influence sur cette absorption. Les mesures doivent donc être ramenées à l'altitude nominale, une estimation du taux de comptage pour la hauteur nominale de vol d'un levé est donnée par :

$$\mathbf{n = n_0 \, exp^{-u\,(H-h)}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (IV-9)$$

Ou :

n : est la valeur corrigée du taux de comptage pour la hauteur de vol nominale H.

n_0 : est la valeur observée du taux de comptage à la hauteur h à TPS

μ : est le coefficient d'atténuation (par mètre).

Le coefficient d'atténuation μ est relié à la densité de l'air par la relation :

$$\mu = \mu_m * P \text{ ……………………(IV-10)}$$

Ou :

μ_m : est le coefficient d'atténuation (absorption) massique

La hauteur h à température et pression standard (STP) doit être corrigée en fonction de la température et la pression ambiante étant donné que les 2 facteurs affectent la densité de l'air et ainsi ses propriétés d'atténuation. La hauteur équivalente à la température (273 ,15 k) et pression (101,325 kpa) C'est-à-dire la hauteur TPS est donnée par la relation :

$$\mathbf{h_{STP} = (273.15 * P * h_{obs}) / ((T+273.15)*(101.325))} \text{ …………………. (IV-11)}$$

Où :

h_{obs} : hauteur mesurée par rapport au sol (mètre)

h_{stp} : hauteur équivalent à TPS

T : température de l'air (°C)

P : pression barométrique (kpa)

IV-I-5-Calcule de concentrations équivalentes :

Les mesures de spectrométrie gammas sont souvent présentées en unité cps .ceci n'est certainement pas commode car les taux de comptage ne dépende pas uniquement de la concentration en radioélément du sol, mais aussi de l'équipement de mesure et de l'altitude nominale de vol, ce qui rend difficile la comparaison des résultats de deux levés différents.

Indépendante de l'instrument et des paramètres de vol en conséquence, les taux de comptage doivent être convertis aux concentrations équivalentes en radioélément

La conversion est habituellement effectuée en divisant chacun des 3canaux corrigés par des coefficients de sensibilité. Ces coefficients de sensibilité sont estimés, pour chaque fenêtre, en effectuant des lignes de vol au-dessus d'une zone d'étalonnage .la concentration en radioélément le long de la zone d'étalonnage est mesurée en employant un spectromètre portatif parfaitement étalonné.

Les concentrations du sol en radioéléments sont estimées en divisant les taux de comptages des 3 fenêtres (corrigés du bruit de fond, de l'effet Compton et ramenés à l'altitude nominale) par les coefficients de sensibilité.

$$C = N / S \qquad \text{(IV-12)}$$

Où :
S : coefficient de sensibilité
N : le taux de comptages des 3 fenêtres
C : la concentration moyenne du sol en radioéléments

IV-I -6-Filtrage des données :

Pour améliorer le traitement des données nous appliquons deux types de filtres : Un filtre non linéaire et un filtre pas bas.

- ✓ le filtre non linéaire est appliqué avant tout les corrections pour éliminer les bruits dont des hautes fréquences (courtes longueurs d'onde)
- ✓ le filtre pas bas est appliqué pondant les corrections pour lisser le signal

Et améliorer les calculs statistiques (éliminer les anomalies de courtes longueurs d'onde)

IV-II-Les problèmes de traitement :

- ➢ **Le temps mort**

Nous n'avons aucune information sur le temps mort de l'instrument utilisé pour cela, nous avons utilisé une valeur moyenne standard de 12µs.

- ➢ **Absence de données de calibration sur le bruit de fond des levés :**

Nous n'avons pas des informations sur :

- ❖ le bruit de fond d'avion.
- ❖ le bruit de fond cosmique
- ❖ le bruit de fond de radon

En réalité le bruit de fond est estimé par les méthodes suivantes :

- ✓ On oriente le capteur vers le haut
- ✓ On survole au-dessus d'une masse d'eau
- ✓ On survole avec une altitude supérieure à 1000 m

Dans notre travail on ne peut pas appliquer cette correction.

➤ **Absence de mesures des rapports d'enlèvement :**

En réalité, Les rapports d'enlèvement sont déterminés par calibrage au-dessus des sources spéciales (blocs d'étalonnages). Dans notre cas, nous n'avons aucune information sur ces rapports et pour cela, nous avons pris les valeurs suivantes qui sont déterminées empiriquement par (Paterson, Grant, Watson 1977 in D .Groune 2009)

α=0.45
β=0.59
γ=0.94
a=0.05
b=0.00
g=0.00

➤ **Absence des données de température et de pression :**

Lors de l'acquisition les mesures de la température et de pression n'ont pas été enregistrées, dans notre cas nous avons procédé comme suit :

- **La température** :

Nous avons calculé une température moyenne de quatre saisons qui est égale à 23.2°C, d'après les données de la météo de la région :

La température moyenne maximale 32.1°C

La température moyenne minimale 14. 3°C

- **La pression :**

La pression peut être obtenue par la formule empirique suivante :

$$\mathbf{P = 101.325^{(-H/8581)}} \quad \text{………………………..(IV-13)}$$

Où :

H = altitude barométrique en mètres

Comme nous n'avons pas les valeurs pratiques de H nous avons utilisé le modèle numérique de terrain pour extraire les valeurs d'altitude topographique (Z) qui seront sommées avec les valeurs d'altimètre radar.

H = Altitude topographique + Altitude radar ………… (IV-14)

- **Absence de mesures de calibration pour l'atténuation dans l'air :**

Aucune donnée pour la calibration de l'atténuation du signal dans l'air n'était disponible, et pour cela nous avons utilisé les coefficients pour les quatre canaux :

μ_{CT} =0.0070

μ_{Th}=0.0088

μ_{U} = 0.0082

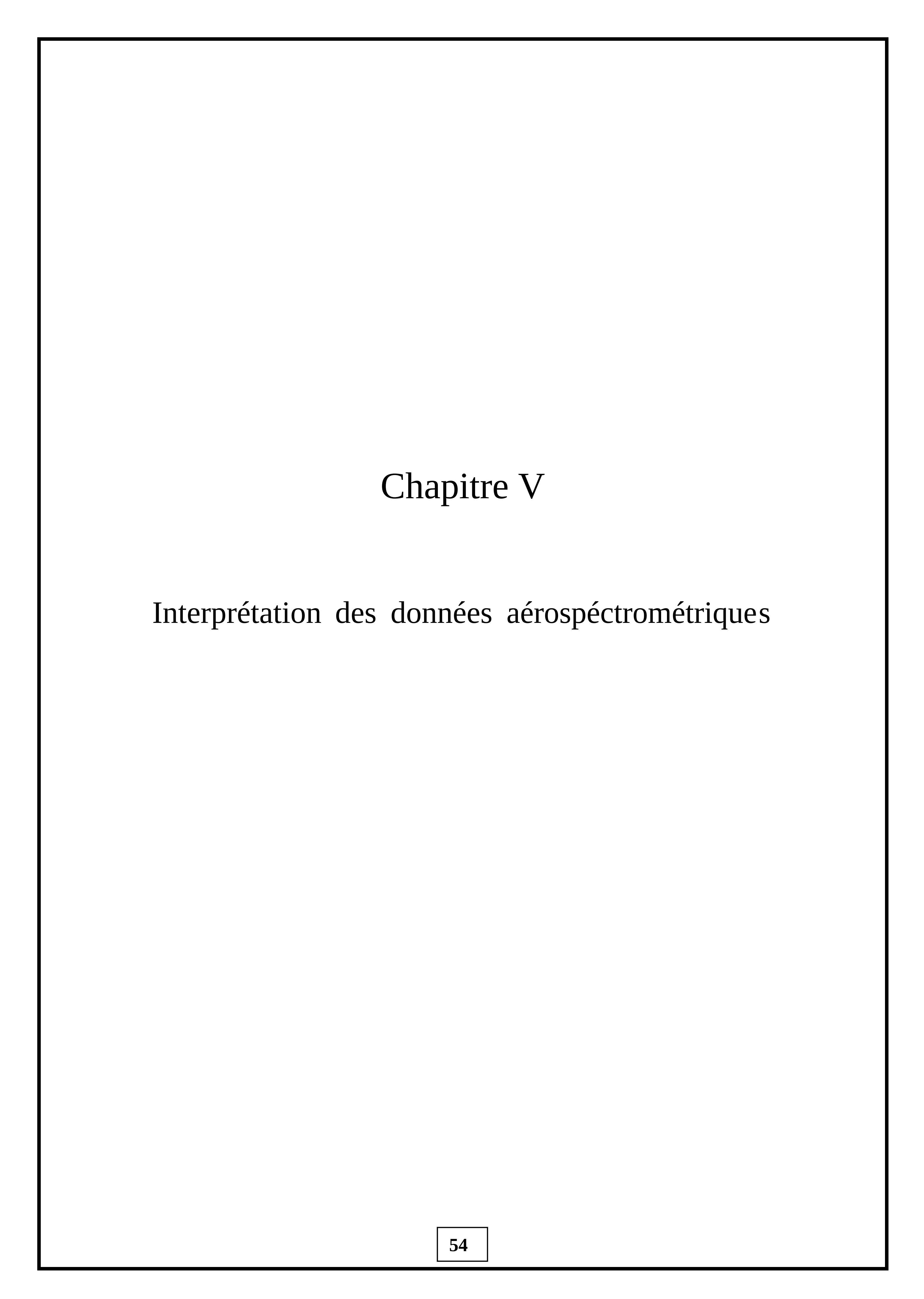
μ_{k} = 0.0070

- **Absence de mesures de calibration de sensibilité :**

Les appareils de mesure de la radiométrie enregistrent chaque spectre en comptes (cps). Le nombre de coups pour une concentration d'un radioélément donné au sol dépend de la sensibilité de l'appareil de mesure, qui est surtout en fonction de la taille du cristal .aucune information sur la sensibilité de l'appareil n'est disponible. Les données n'ont donc pu être transformées en équivalent ppm% et restent donc qualitatives.

Pour éviter ce problème, nous avons utilisé des coefficients de sensibilités standards.

K_1 = 0.24
K_2 = 0.20
K_3 = 0.18



Chapitre V

Interprétation des données aérospéctrométriques

Chapitre-V : l’interprétation des données spectrométriques :

La **s**pectrométrie est une méthode surfacique et indirecte pour la détection des gisements d’hydrocarbures car elle est basée sur des processus géochimique. Ces processus sont le résultat de l’influence d’hydrocarbures sur les teneurs des trois éléments radioactifs (Th, U, K). L’apparition d’anomalies géochimiques en surface est due au phénomène de micro ou macro fuite d’hydrocarbures comme est montrée dans la figure V-2**.** Dans ce travail nous nous intéressons à l’identification des anomalies dues à la microfuite d’hydrocarbures à partir de l’interprétation des données aérospéctrométriques à rayon gamma.

V- 1- La micro fuite d’hydrocarbure (microseepage) :

La plupart des accumulations de pétrole et de gaz fuient à cause de l’existence de la pression et les fractures des roches en profondeur (Saunders, 1993). Cette fuite (ou microseepage) est répandus principalement à la verticale des accumulations. Les microfuites d'hydrocarbure se produisent dans tous les bassins de pétrole et forme la base pour les méthodes de détection géophysiques.

V-1-1-Définition :

La microfuite d'hydrocarbure est généralement expliquée comme le résultat de la remontée verticale de petites bulles de forme sphéroïdales de micro éléments d’hydrocarbures légers à travers un réseau de fracturations qui existent à l'intérieur des formations rocheuses (Saunders et al, 1999). Par conséquent, la présence de la microfuite en surface refléterait les accumulations qui pourraient être stockée dans la su surface. Pour la détection indirecte de la microfuite, des aperçus développés sont visés à tracer les effets qui peuvent apparaitre par la microfuite dans l'environnement. Ceux-ci incluent les changements physiques et chimiques dans le sol comme indique la figure V-2-a (Saunders et autres 1993 et Schumacher 1996).

V-1- 2-caractéristiques :

La microfuite d’hydrocarbures est définie par les caractéristiques suivantes qui sont représentées dans la figure V-1 :

- Principalement vertical : les bulles d’hydrocarbures prennent un chemin vertical vers la surface

- dynamique : elle subit les lois de la Physique (mouvement dynamique).
- non visible : elle se produit à l’échelle microscopique



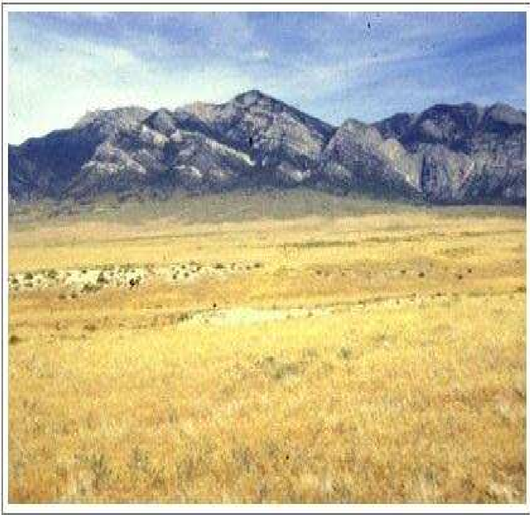


Fig V-1 a) la macrofuite (visible) b) la microfuite (invisible)

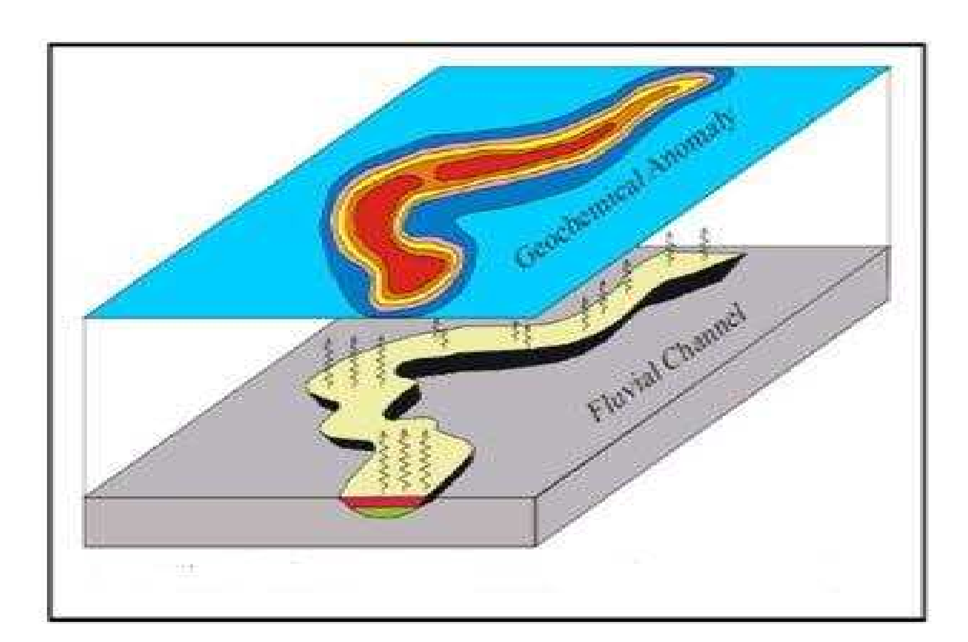


Fig V-2- : les caractéristiques de la microfuite

V-1 -3 – Signatures (indices) :

Il y a plusieurs indices et signatures qui indiquent l'existence de la microfuite dans tous les environnements (sols, eau et atmosphère), ils sont illustrés et résumés dans les points suivants :

- ✓ Anomalies de rayonnement.
- ✓ Concentrations anormales d'hydrocarbure dans le sol et dans l'eau.
- ✓ Anomalies microbiologiques.
- ✓ Changements minéralogique tel que la formation de la calcite, la pyrite, l'uranium, le soufre et les oxydes de fer magnétiques.
- ✓ Anomalies acoustique.
- ✓ Changements électrochimiques.

V-2-L'exploration géochimique d'hydrocarbures :

Après la remonté d'hydrocarbures à la surface par le processus de micro fuite en présence de conditions d'aérobie (O_2, les bactéries), la matière organique subit une dégradation microbienne qui génère des processus géochimiques, à partir de ces derniers les géochimistes peuvent détecter les hydrocarbures par les indices suivants :

- ➢ les concentrations d'hydrocarbures anormales dans les sédiments, le sol, l'eau et l'atmosphère.
- ➢ altérations de minéraux argileux
- ➢ des changements minéralogiques tels que la formation de calcite, pyrite, de l'uranium, soufre et certains oxydes de fer magnétiques (c'est les éléments ferromagnétiques comme l'Hématite) et des sulfures.
- ➢ les anomalies microbiologiques.

L'exploration géochimique pour la recherche des hydrocarbures se fait par l'échantillonnage du sol en creusant de petites trous de quelques dizaines de

centimètres jusqu'à 1m (figure V-3). Ensuite, des analyses spécifiques sont effectuées sur les échantillons.



Fig V-3 : L'exploration géochimiques pour la recherche d'hydrocarbures.

L'exploration géochimique est une méthode efficace pour la recherche d'hydrocarbures car elle est caractérisée par plusieurs avantages :

- une méthode directe.
- applicable dans tous les environnements (offshore/ on shore).
- un taux de succès élevé qui peut atteindre 70% - 80% (Dietmar Schumacher, 2012).

Remarque : Chaque résultat d'exploration géochimique doit être suivi par une acquisition sismique pour confirmer et localiser les réservoirs d'hydrocarbures trouvés (Fig V-4).

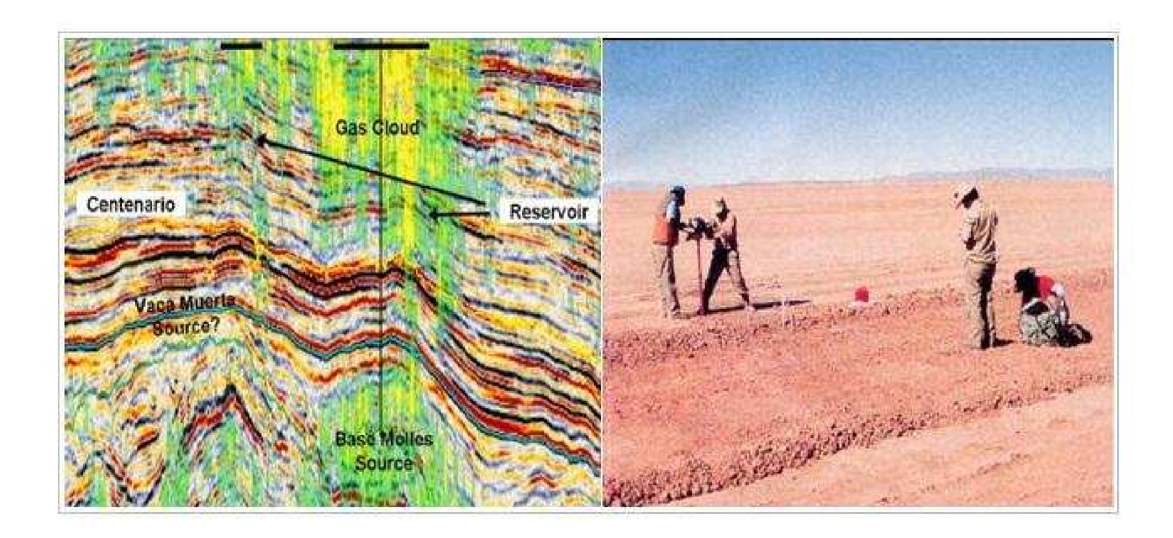


Fig V-4 : les résultats d'exploration géochimique sont confirmées par la sismique.

V-3-L'insuffisance de la géochimie :

Malgré que l'exploration géochimique a plusieurs avantages mais elle prend beaucoup de temps pour balayer une grand surface et elle nécessite un grand nombre d'échantillons pour avoir un résultat efficace (figure V-5). Comme il y'a une équivalence entre les anomalies géochimiques et radiométriques, la prospection spectrométrique est une alternative intéressante permettant de résoudre ce problème.

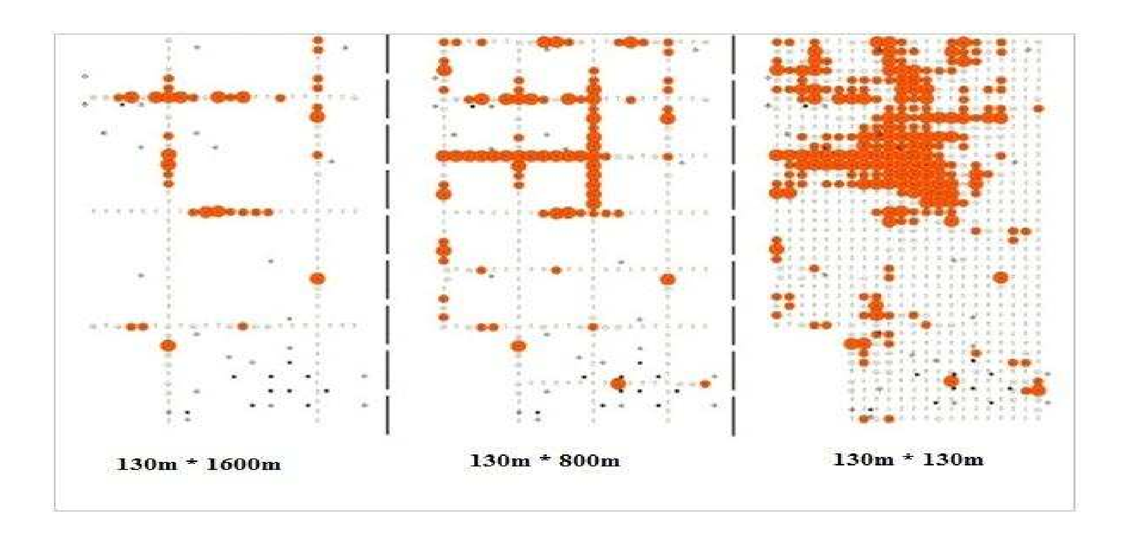


Fig V-5 : l'efficacité d'exploration géochimique nécessite un grand nombre d'échantillons

V-4-Principes d'utilisation de la méthode radiométrique pour la détection indirecte de microfuite d'hydrocarbures :

La dégradation microbienne d'hydrocarbures présents dans les sols au-dessus de micro-fuites d'hydrocarbures consomme de l'oxygène et rend le milieu réducteur (Tedesco, 1995), ce qui favorise la précipitation de l'uranium, transporté par les eaux souterraines ($UO2^{2+}$). L'uraninite (UO2) ainsi précipitée s'accumule progressivement dans les sols et peut être détectée grâce à un spectromètre gamma portable à haute résolution (IAEA, 2003). À l'inverse, le potassium (K) est parfois progressivement lessivé par les fluides réducteurs et acides circulants dans la zone de dégazage. La superposition de zones lessivées en K et enrichies en U a été observée au-dessus ou à proximité de plusieurs réservoirs d'hydrocarbures exploitables.

La croûte terrestre contient des radionucléides d'uranium, de thorium et de potassium distribués d'une façon hétérogène sur la Terre. Ces éléments émettent des rayons gammas à haute énergie lors de leurs décroissances radioactives. L'uranium est le plus mobile des trois radionucléides énumérés ci haut (Bea, 1999). En contexte oxydant, cet élément est mobile et soluble dans l'eau et peut être déplacé latéralement par le mouvement des eaux souterraines et de ruissellement. Dans un contexte réducteur, comme celui normalement associé à un milieu affecté par des micro-fuites d'hydrocarbures, le milieu devient rapidement réducteur et l'uranium peut devenir insoluble et précipiter. Un cas fréquent est la rencontre d'eaux souterraines oxydantes et de matériaux riches en matières organiques qui peut favoriser une accumulation d'uranium.

Pour l'exploration gazière ou pétrolière, la distributionnaturelle des radionucléides comme l'uranium et le potassium devient perturbée au voisinage de fuites d'hydrocarbures ce qui permet la détection de secteurs d'anomalies potentiellement associés à la présence d'hydrocarbures en profondeur. Un enrichissement élevé en uranium peut être associé à une zone de micro-fuites d'hydrocarbures suite à la réduction de l'uranium et à sa précipitation (Schumacher, 2000). La décomposition d'hydrocarbures en subsurface produit beaucoup de CO2 qui par réaction avec l'eau forme de l'acide carbonique capable de solubiliser le potassium des sols (et autres substrats) en produisant des anomalies caractérisées par une forte diminution de concentrations en potassium comme indiqué dans la figure V-6 suivante.

Remarque :

Le Th n'est pas contaminé par le processus d'altération et sa concentration reste presque constante.

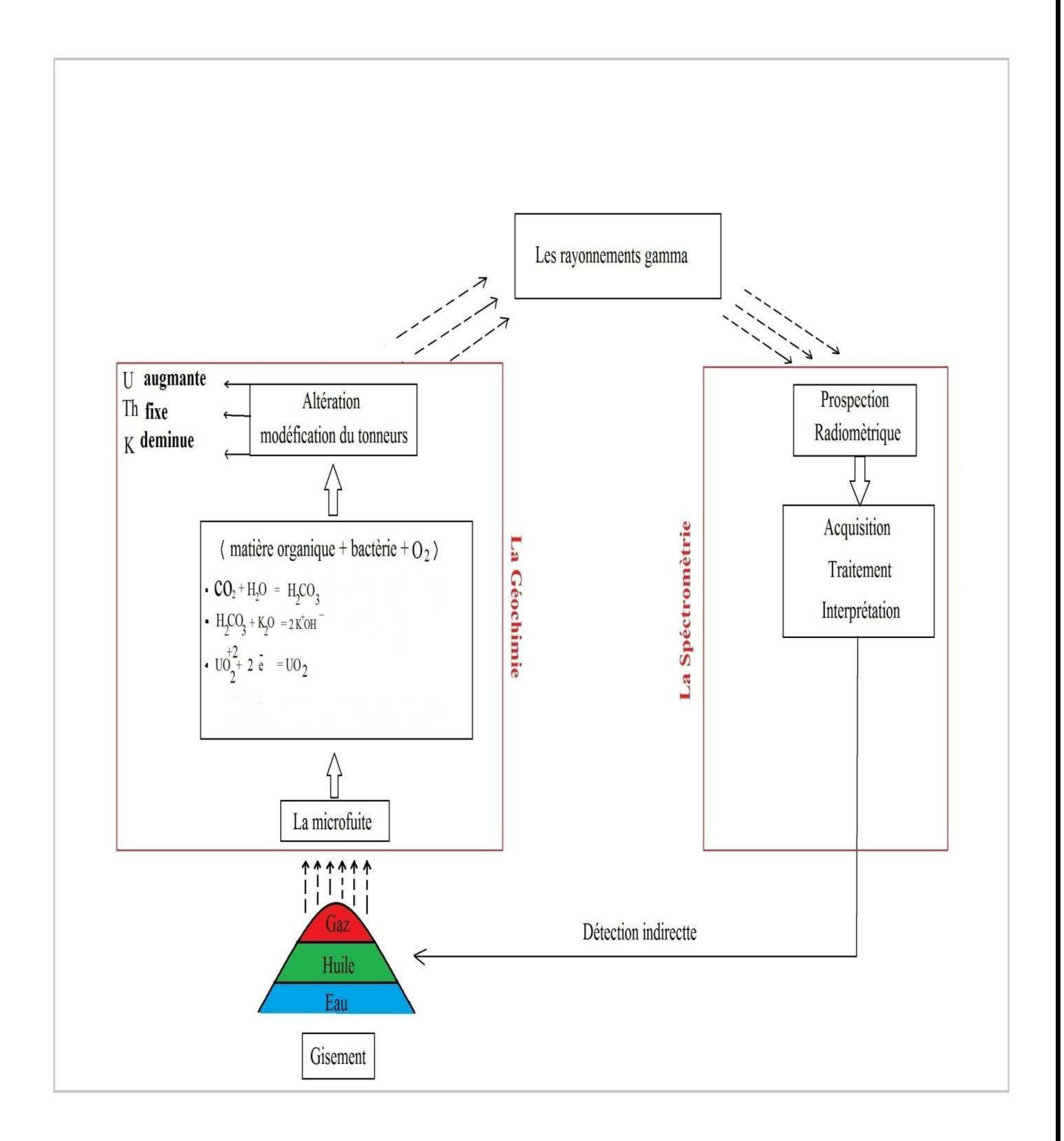


Fig V-6 : La relation entre la géochimie et la spectrométrie

V-5-Méthode d'analyse de Saunders (normalisation de thorium) :

Saunders(1993,1994), Curto (2012) et El Sadek (2002) ont développé La méthode de normalisation du thorium pour supprimer les contributions régionales géologiques et améliorer les variations locales de la concentration des valeurs K et U, les teneurs des trois éléments (U, Th et K) pour les quatre roches sédimentaires les plus connus sont représentées dans le tableau V-1. La technique de normalisation Th-K et Th-U est basé sur les deux points suivants :

- La teneur du thorium n'est pas modifiée par l'altération, donc il est considéré comme un marqueur de la lithologie.
- La relation linéaire et proportionnelle entre (Th -K) et (Th-U).

Cette technique peut être appliquée de deux manières (La méthode simplifiée et la méthode de la régression linéaire)

La méthode simplifiée :

D'après ces notions nous pouvons calculer les valeurs idéales (K_{i}, U_{i}) par les formules suivantes :

$$K_i = (moyK_S / moyTh_S) * Th_S \text{ ………………..(V-1)}$$

$$U_i = (moyU_s / moyTh_s) * Th_s \text{ ……………..(V-2)}$$

Où :

Ki : le potassium idéal

Ui : l'Uranium idéal.

Th_S : le Thorium corrigé (réale).

K_S : le Potassium corrigé (réale).

U_s : l'Uranium corrigé (réale).

Le calcul des valeurs résiduelles relatives (K_{res}, U_{res}) permet d'éliminer les contributions régionales géologiques, topographique et environnement qui donné par les relations suivantes :

$$KD\% = (K_S - K_i) / K_S \text{ ……………..(V-3)}$$

$$UD\% = (U_S - U_i) / K_S \text{ ……………..(V-4)}$$

Finalement nous calculons les valeurs de DRAD qui sont la différence entre les valeurs résiduelles relatives de (U et K) :

$$\textbf{DRAD=UD\%-KD\%} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots..(V\text{-}5)$$

Où :

DRAD : la différence entre l'écart des anomalies radiométriques.

UD% : valeurs relatives de l'Uranium

KD% : valeurs relatives du Potassium

La méthode de la régression linéaire :

Les valeurs idéales (K_i, Ui) sont calculées par les formules suivantes :

$$\mathbf{K_i = b + a * Th_s} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots..(V\text{-}6)$$

$$\mathbf{U_i = b + a * Th_s} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots..(V\text{-}7)$$

Où :

a: la pente de la droite de régression.

b: l'intercepte de la droite.

Les valeurs résiduelles relatives (K_{res}, U_{res}) et DRAD sont calculées par les mêmes formules précédentes.

Remarque :

- La méthode de régression linéaire est plus précise que la méthode simplifiée.
- Les valeurs positives de DRAD sont des indications favorables d'accumulation d'hydrocarbures

Type de Roche	Th (ppm)	U (ppm)	K (%)
Evaporite	0.4	0.1	0.1
Carbonate	1.6	0.6	0.3
Grés	5.7	1.9	1.2
Argile	11.2	3.7	2.7

Tab V-1 : La teneur moyenne des trois radioéléments naturels dans les roches sédimentaires

Le schéma suivant (Fig V-7) explique prélèvement la méthode de normalisation du Thorium et identifier les différents sources de modification des éléments radioactifs en calculant les valeurs résiduels :

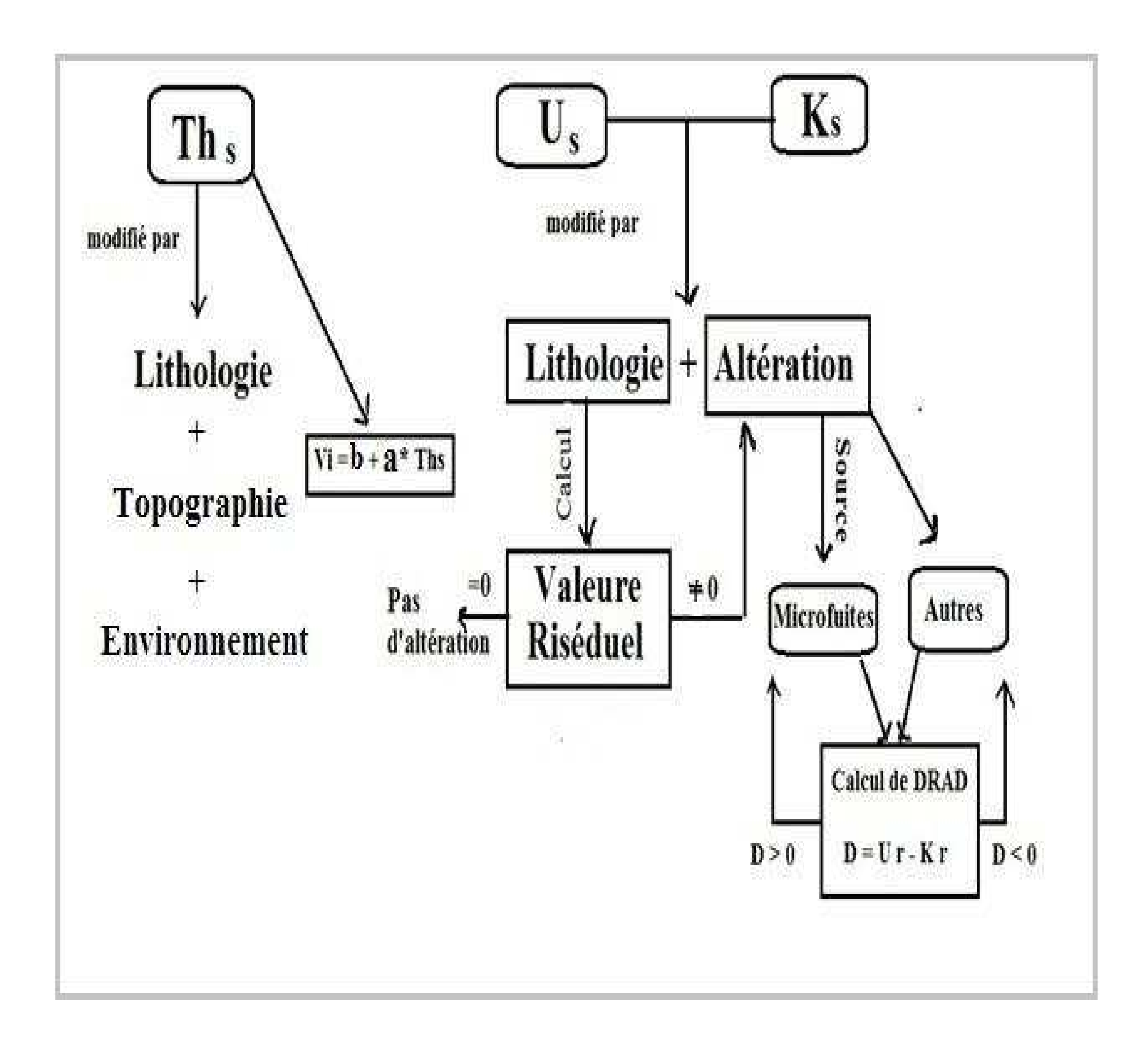


Fig V-7 : schéma explicatif de la méthode de normalisation du Thorium

V-6-Application à la région de Graret l'Edda :

Après l'application de la méthode de normalisation du thorium sur les données traitées nous avons obtenu les résultats suivants qui sont représentés dans les deux tableaux suivants:

Line	Min DRAD	Max DRAD	Moy	E T	Moy+3E T
L51180	-0.3991299	0.7346717	0.0112252	0.29404911	0.89337252
L51185	-0.6291571	1.7804279	0.0734626	0.48371208	1.52459882
L51190	-1.1917426	1.1138084	-0.0078278	0.27464586	0.81610977
L51196	-1.7046991	1.0408768	0.0037668	0.32197935	0.96970486
L51200	-0.781106	0.7033791	-0.0331763	0.28022717	0.80750518
L51205	-1.225444	1.217602	-0.0119627	0.34450192	1.02154307
L51210	-1.5976282	0.7357617	-0.0253227	0.33225862	0.97145315
L51215	-1.2414175	1.0040703	-0.0115939	0.3136486	0.92935192
L51220	-0.9027596	0.8418888	-0.0106355	0.26890716	0.79608599
L51225	-1.4482914	1.5541609	-0.0051114	0.33899849	1.01188405
L51230	-1.2903948	4.3532345	0.0003831	0.42201066	1.26641509
L51235	-0.7783563	1.5229448	0.0070957	0.34150916	1.03162321
L51240	-1.3064207	0.8830482	-0.0044793	0.31404523	0.93765643
L51245	-2.3060388	1.1196114	0.0010772	0.35153704	1.05568835
L51250	-1.4171089	1.389602	0.0016196	0.30050498	0.90313449
L51255	-4.3187375	1.2077486	-0.0157103	0.35482423	1.04876239
L51261	-2.2061938	0.8940309	-0.0214867	0.3614993	1.06301115
L51262	-0.7576377	0.8658978	-0.0190717	0.26627985	0.77976788
L51265	-1.7981995	1.5381217	0.0020145	0.35909839	1.0793097
L51266	-1.3464572	1.3901808	-0.0235417	0.30808608	0.90071657
L51271	-1.1294827	0.752604	-0.0243362	0.24827513	0.72048917
L51273	-4.0867751	1.7812107	-0.2658546	0.85129322	2.28802507
L51275	-1.0960833	1.6016367	0.0063404	0.3265839	0.98609215
L51280	-0.8816572	0.9764882	-0.0060702	0.30209111	0.90020309
L51285	-0.9639396	1.5459686	-0.0057111	0.30597394	0.91221073
L51290	-1.0625577	1.1176175	-0.0133028	0.29402774	0.86878044
L51295	-1.2294833	1.3793291	-0.0102635	0.31769261	0.94281436
L51300	-2.3353954	1.4230529	-0.0026207	0.33759323	1.01015902
L51305	-1.1407737	1.6044465	0.0007544	0.36349168	1.0912294

L51308	-1.3220033	0.5980113	-0.0074797	0.30365635	0.90348934
L51310	-1.2590161	2.003295	0.0016919	0.36469589	1.09577958
L51315	-1.357483	1.4109379	-0.0164683	0.30160794	0.88835555
L51320	-1.5486688	1.5598462	-0.0080351	0.35517036	1.05747598
L51325	-1.57389	3.3609006	-0.0015571	0.45278454	1.3567965
L51326	-0.9070925	1.2370462	0.0048723	0.24936795	0.75297617
L51330	-1.0340518	1.6398413	0.1571974	0.55605278	1.82535574
L51331	-0.870004	1.3586672	0.0005462	0.23589612	0.70823454
L51335	-0.9763806	0.8364452	-0.0110089	0.24419926	0.72158885
L51340	-1.1153437	0.6497156	-0.0297884	0.27055304	0.78187076
L51345	-1.1867834	0.6055669	-0.0168537	0.24638811	0.7223106
L51350	-1.6842835	0.8067871	-0.017656	0.26518056	0.77788567
L51355	-0.9680187	1.0067259	-0.0024149	0.25894814	0.77442949
L51360	-1.4257634	0.6457501	-0.0341367	0.29142724	0.84014496
L51365	-0.7937788	0.3676222	-0.0227111	0.20694535	0.59812499
L51366	-0.6477126	1.6863945	0.0074911	0.24857464	0.75321503
L51370	-0.885706	0.5278655	-0.0161807	0.1938452	0.56535494
L51375	-0.8117844	0.5038349	-0.0106821	0.20663076	0.60921019
L51380	-0.7234978	0.4475225	-0.0142402	0.17030899	0.49668681
L51550	-0.7766983	0.8864951	-0.0066884	0.2580397	0.76743073
L51560	-0.8960035	1.4605285	0.0052094	0.34342686	1.03548996
L51570	-1.0135066	0.9092057	-0.0054752	0.29193536	0.87033091
L51610	-0.8031795	0.810642	-0.0223433	0.21754543	0.63029299
L51620	-2.7702868	0.7655612	-0.002631	0.24383771	0.72888211
				La moyenne	0.93942284

Tab V-2- DRAD 1 calculé par la méthode simplifiée

Line	Min DRAD	Max DRAD	Moy	E T	Moy+3E T
L51180	-0.27081	0.7465277	0.0219643	0.2781576	0.85643718
L51185	-0.616832	1.5178996	0.0566674	0.4497207	1.40582945
L51190	-0.726037	1.1450718	0.014776	0.2564028	0.78398431
L51196	-0.867977	1.066247	0.0239833	0.2737023	0.8450903
L51200	-0.606846	0.7465752	-0.0144351	0.2624658	0.77296226
L51205	-1.042492	0.9491305	-0.1131744	0.3330647	0.88601965
L51210	-1.165381	0.7678199	-0.008414	0.2973493	0.88363376
L51215	-0.931209	0.9734384	0.0074214	0.2961305	0.89581279
L51220	-0.736421	0.8702638	0.0133519	0.2434755	0.74377848
L51225	-1.30684	1.5199477	0.0258476	0.3419142	1.05159019
L51230	-1.151389	4.3337396	0.0290397	0.3953666	1.21513958
L51235	-0.720675	1.60409	0.0197918	0.3359277	1.02757485
L51240	-0.766338	0.8814129	0.0256232	0.2838829	0.87727199
L51245	-1.250529	1.3333666	0.0286729	0.3314543	1.0230359
L51250	-0.889583	1.3726599	0.0165671	0.2819011	0.8622705
L51255	-2.089275	1.2823535	0.0033286	0.3063913	0.92250248
L51261	-1.597009	1.0862866	0.0079059	0.3325685	1.00561158
L51262	-0.677029	0.8628895	-0.0090945	0.2569318	0.7617008
L51265	-0.988599	1.563288	0.005617	0.322501	0.97312
L51266	-1.186225	1.7051979	-0.0032809	0.278954	0.833581
L51271	-0.640546	0.8297607	-0.006937	0.2243454	0.66609914
L51273	-0.889374	2.1151889	0.2721861	0.6914773	2.346618
L51275	-0.801134	1.6150527	0.0132995	0.3222844	0.98015253
L51280	-0.912494	0.9771228	0.0112667	0.2918657	0.88686382
L51285	-0.917968	1.7278082	0.0052221	0.3002738	0.90604357
L51290	-1.110826	1.1929035	0.0036514	0.278408	0.83887544
L51295	-0.896985	1.3758916	0.0062022	0.2818665	0.8518017
L51300	-1.614264	1.3765783	0.0161647	0.3052874	0.93202695
L51305	-0.864767	1.6274235	0.0134942	0.3283834	0.99864434
L51308	-1.070194	0.579721	-0.006126	0.247235	0.735579
L51310	-0.967956	2.0366811	0.0113274	0.3534662	1.07172608
L51315	-1.114696	1.3708679	-0.0032283	0.2774249	0.82904639
L51320	-1.531657	1.6981918	0.0144649	0.3322915	1.01133937

L51325	-0.97619	3.6047069	0.0328876	0.3739781	1.15482197
L51326	-0.578925	1.1416746	0.0127313	0.2368606	0.7233132
L51330	-0.848235	1.7441361	0.172458	0.5171119	1.72379378
L51331	-1.00775	1.0439835	0.0049791	0.2200527	0.66513733
L51335	-0.785785	1.0419596	0.000904	0.2416511	0.72585741
L51340	-0.924004	0.656467	-0.017061	0.249229	0.730626
L51345	-0.804442	0.6182013	-0.0045594	0.2230048	0.66445483
L51350	-0.988778	0.7752305	-0.006973	0.2329854	0.69198304
L51355	-0.832532	1.0541265	0.0054813	0.2575967	0.77827131
L51360	-0.831628	0.6541313	-0.0147429	0.2487991	0.73165448
L51365	-0.51118	0.3728758	-0.0137788	0.1914681	0.56062537
L51366	-0.713298	1.1396241	0.0077197	0.2397708	0.72703219
L51370	-0.901931	0.571068	-0.0085702	0.1879289	0.55521659
L51375	-0.552109	0.4883447	-0.0093117	0.2055754	0.60741436
L51380	-0.652454	0.403386	-0.0124235	0.1658155	0.48502301
L51550	-0.75208	0.879393	0.0032434	0.2528677	0.76184666
L51560	-0.868118	1.374506	0.0146446	0.3307541	1.00690693
L51570	-0.668938	0.8956842	0.0069535	0.2533482	0.76699804
L51610	-0.729129	0.8513474	-0.0078453	0.2027429	0.60038345
L51620	-0.804801	0.7836587	0.0059712	0.2110199	0.63903076
				La moyenne	0.88645574

Tab V-3 DRAD 2 calculé par la méthode de régression linéaire

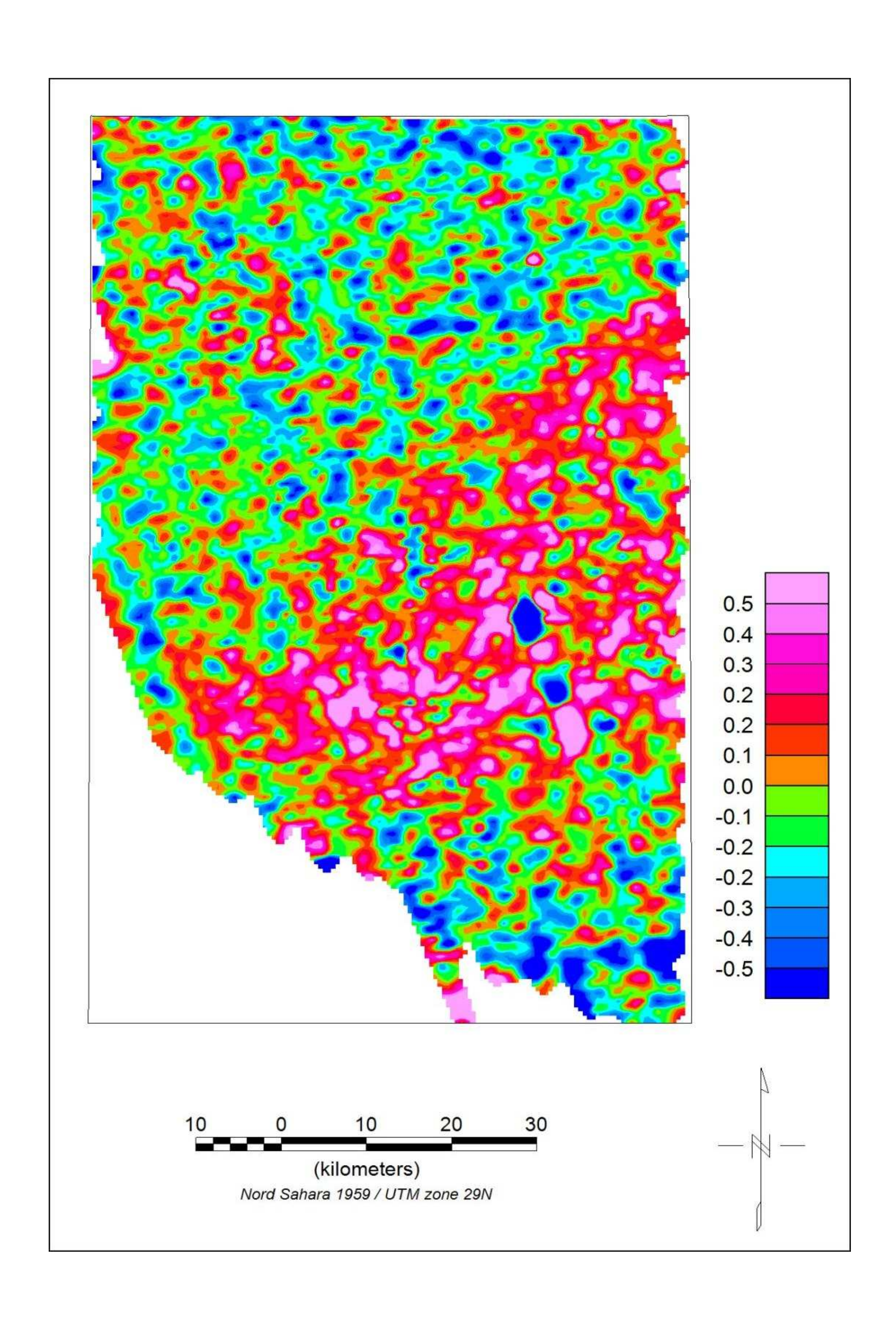


Fig V-8 carte du DRAD 1

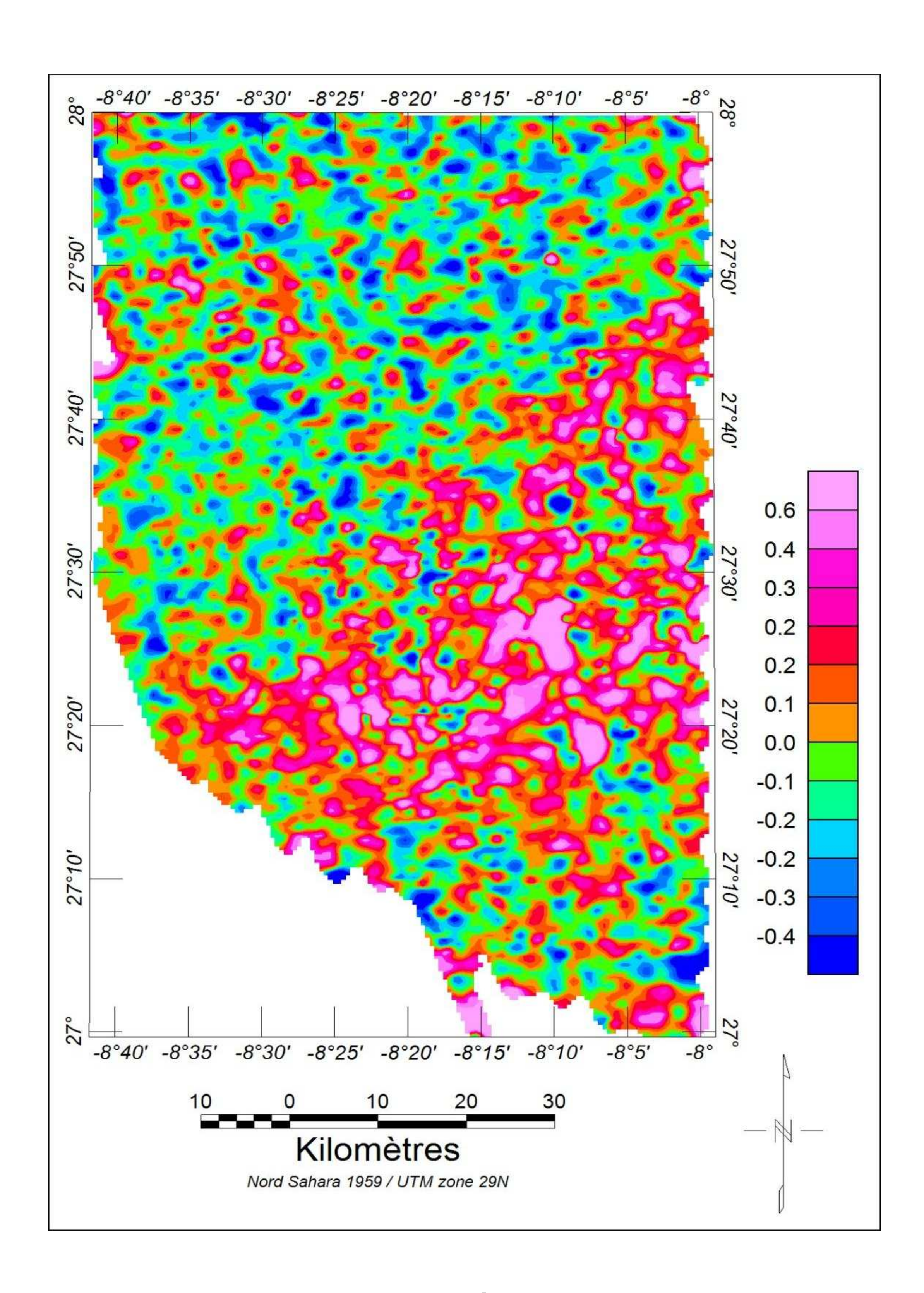


Fig V-9 Carte du DRAD 2

Discussion des résultats :

Les deux cartes représentent les anomalies des DRAD1 et 2(Fig V-8 et Fig V-9 respectivement). Elles présentent pratiquement la même distribution. Nous pouvons diviser cette distribution en deux zones : une zone occupant 2/3 de la surface étudiée et caractérisée par des valeurs négatives où positives de faibles amplitudes**.** Elle ne représente pas d'indices favorables pour la présence d'hydrocarbures. L'autre est caractérisée par des valeurs positives importantes du DRAD de valeurs supérieur ou égale 0.2 (de couleur rouge âtre) qui occupent presque 1/3 de la surface. Cette partie présente une forte probabilité d'existence d'hydrocarbures. Sa partie principale est localisée au sud de la zone d'étude et située entre les latitudes 27°20 ' et 27°48 ' Nord et les longitudes 8° 00' et 8° 30' West.

Pour localiser et limiter les anomalies significatives avec grande précision nous avons appliqué le principe d'Elkins (1940) et Saunders (1989) qui s'exprime comme suit :

Une anomalie est considérée comme telle si sa valeur dépasse la moyenne plus trois fois l'écart type (ET). Dans ce cas d'après Elkins on aura 99.87% de probabilité que ce soit une anomalie.

A partir des deux tableaux du DRAD, les profiles qui vérifient le principe d'Elkins et Saunders sont :

- Pour DRAD1 (méthode simplifiée) : L51180, L51185,L51196 ,L51205 L51210,L51225,L51230 ,L51235, L51245, L51255, L51261, L51265 L51273,L51275,L51295, L51300,L51305, L51310, L51320, L51325, L51330 L51560.

- Pour DRAD2 (régression linéaire) : L51185,L51205,L51215, L51225 L51230, L51235, L51245,L51255, L51261, L51265, L51273, L51275 L51280,L51300,L51305, L51310, L51320, L51325, L51330, L51560,L51325

Analyse des profils des DRAD ayant donnés les mêmes résultats :

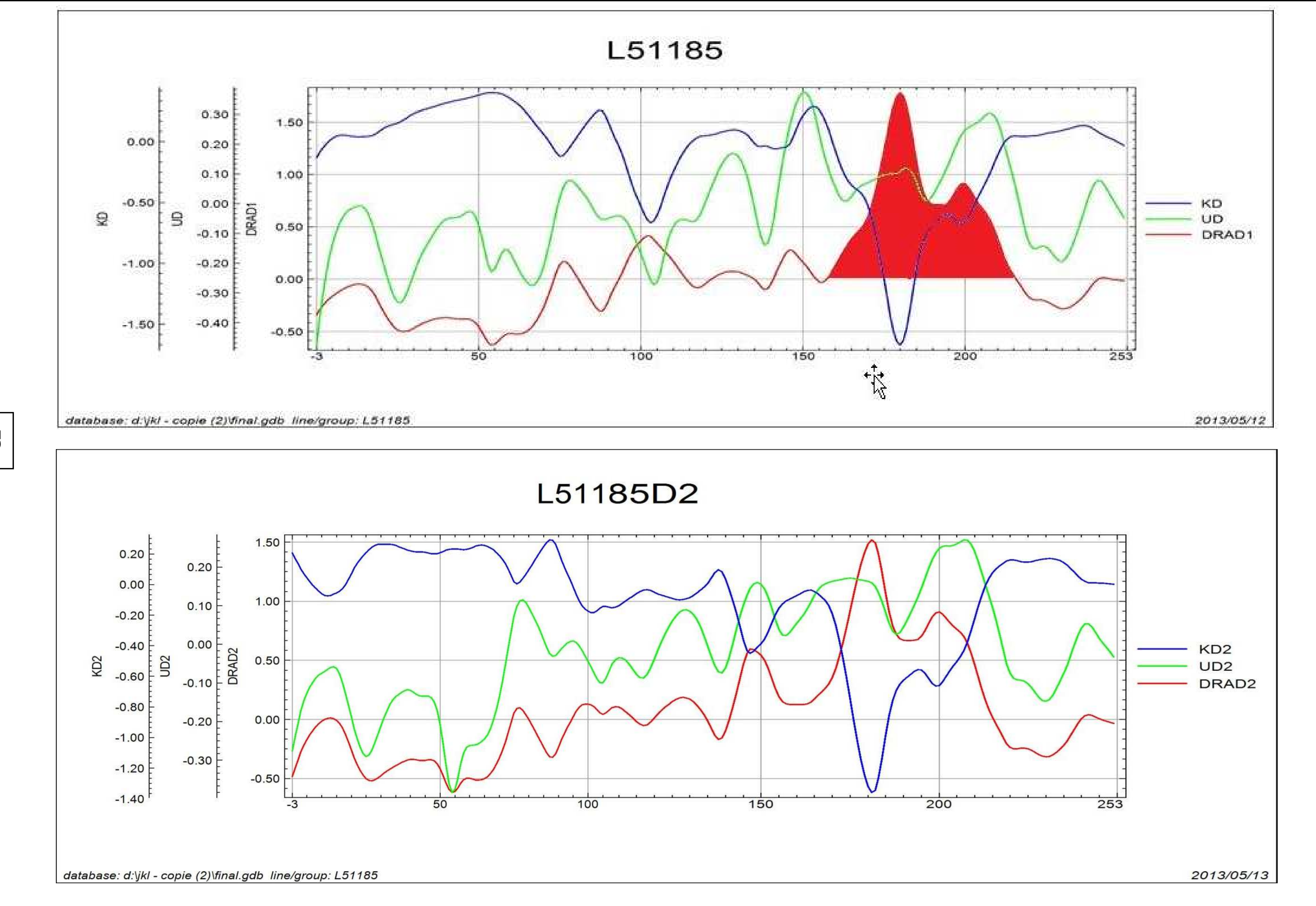
La comparaison des profils deux à deux montre la même allure de variation du DRAD et les mêmes limites de la zone d'intérêt (les Anomalies), mais elles n'ont pas

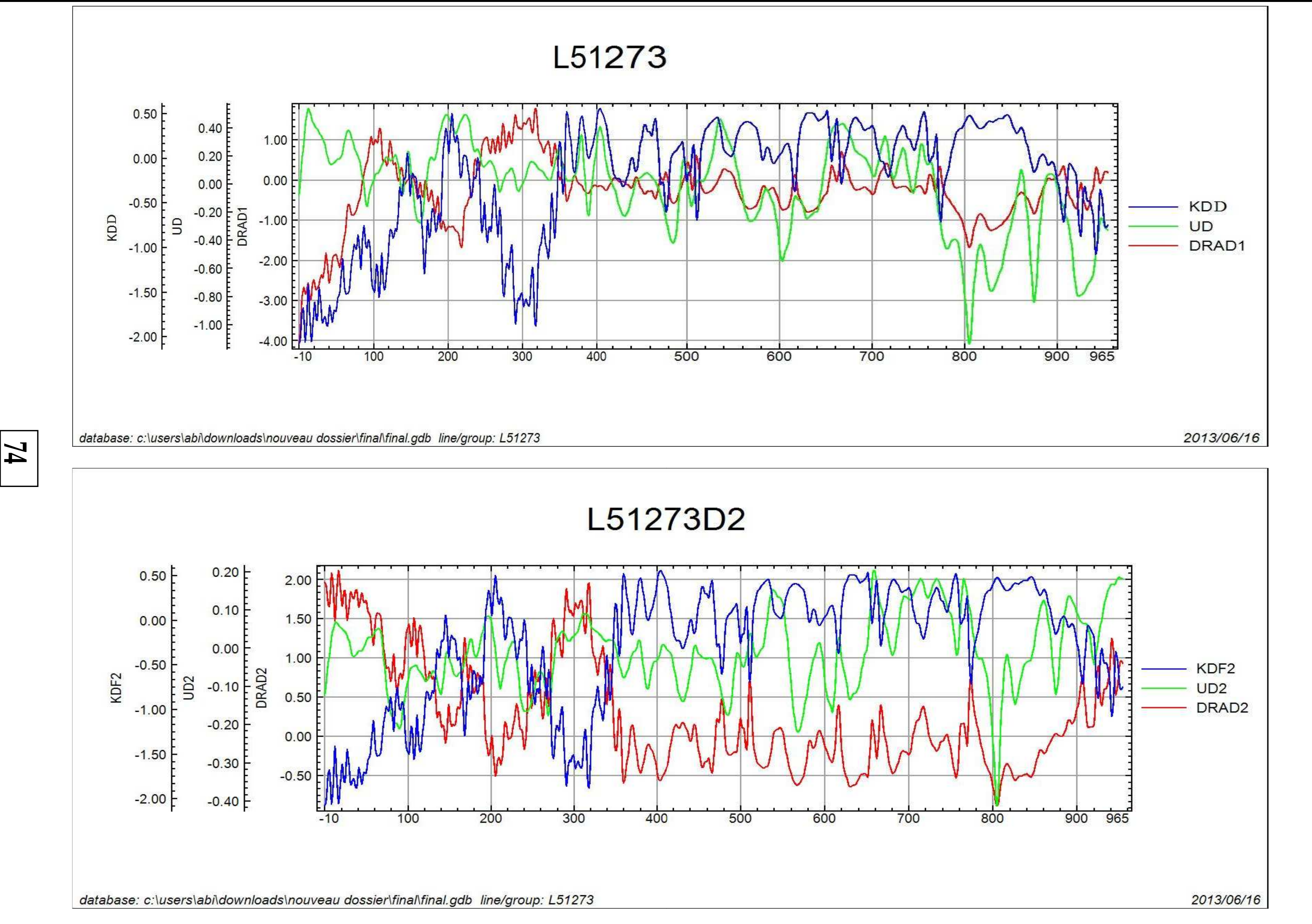
les mêmes amplitudes à cause de la méthode appliquée. Le tableau suivant résume les limites et la longueur des anomalies pour chaque profil, ces limites sont déterminées par la superposition des lignes d'acquisition sur la carte du DRAD :

Line	A1(x_y) en Km	A2(x_y) en Km	La distance (Km)
L51185	595,92_3093,87	598,34 _3086,74	7.04
L51205	594,76_3074,76	598,72 _3065,02	10,75
L51225	587,03_3069,39	598,65_3038,86	32,66
L51230	585,13_3069,31	598,62_3033,67	38.15
L51235	584,02_3066,73	598,84_3027,40	42,02
L51245	581,06_3063,54	596,60_3021,61	45.61
L51255	576,71_3063,59	594,54_3016,30	50,54
L51261	576,40_3058,69	583,99_3038,36	21.67
L51265	578,67_3047,66	582,52_3037,86	10.46
L51273	576,57_3046,86	580,38_3036,95	10.45
L51275	571,36_3055,19	586,27_3016,95	41,04
L51300	564,06_3046,93	576,84_3012,52	36,70
L51305	564,05_3046,42	576,95_3012,80	36
L51310	557,24_3045,43	571,93_3008,61	39.6
L51320	558,44_3037,53	568,36_3012,36	27.05
L51325	557,51_3035,46	559,99_3029,64	6.32
L51330	552,10_3043,46	564,74_3010,28	35.67
L51560	542,34_3022,37	598,60_3043,57	60.12

Tab V-4: Les limites et les longueurs d'anomalies communes

Les graphes des profils ayant donnés les mêmes résultats :


L51185
KD
UD
DRAD1
database: d:\jkl - copie (2)\final.gdb line/group: L51185
2013/05/12
L51185D2
KD2
UD2
DRAD2
database: d:\jkl - copie (2)\final.gdb line/group: L51185
2013/05/13


L51273
KDD
UD
DRAD1
database: c:\users\abi\downloads\nouveau dossier\final\final.gdb line/group: L51273
2013/06/16
L51273D2
KDF2
UD2
DRAD2
database: c:\users\abi\downloads\nouveau dossier\final\final.gdb line/group: L51273
2013/06/16

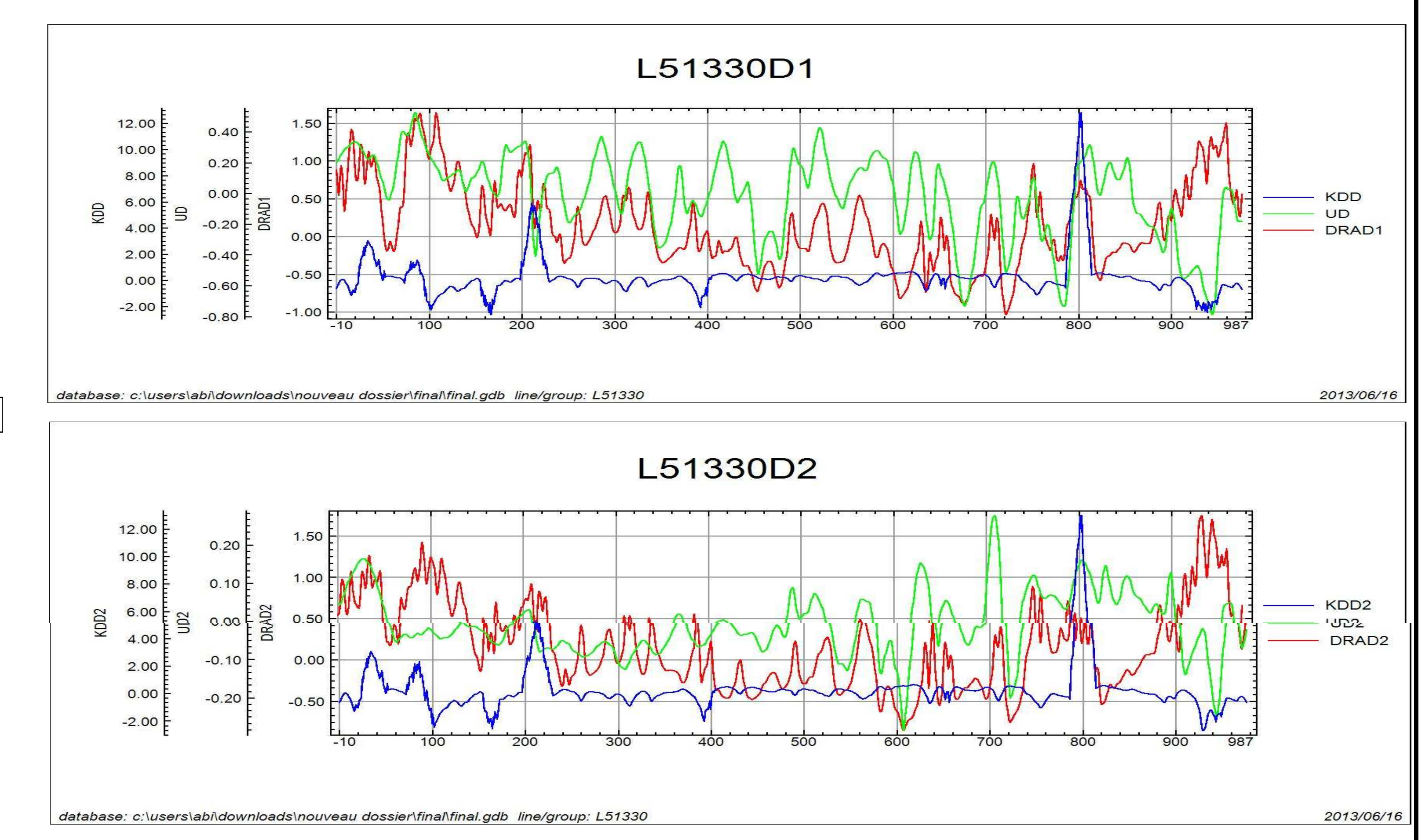


Fig V-10 : Les graphes des profils ayants donnés les mêmes résultats

Analyse des profils des DRAD ayant donnés des résultats divergents:

Puisque la méthode de la régression linéaire est plus précise par rapport à la méthode simplifiée nous avons considéré les profiles du DRAD 2 comme des anomales. Le tableau suivant résume les limites et la longueur des zones d'intérêt :

Line	A1(x—y)	A2(x—y)	La distance (Km)
L51215	590,52_3072,09	598,51_3050,61	22,91
L51280	569,79_3054,31	584,52_3015,54	41,47
L51285	565,06_3055,16	581,57_3012,20	46,02

Tab V-5 : Les limites et les longueurs d'anomalies non communes

Les graphes des profils des DRAD ayant donnés des résultats divergents :

L51180D1

L51196D1

database: e:\geophysique\autres\meilleure\final.gdb line/group: L51196

2013/05/30

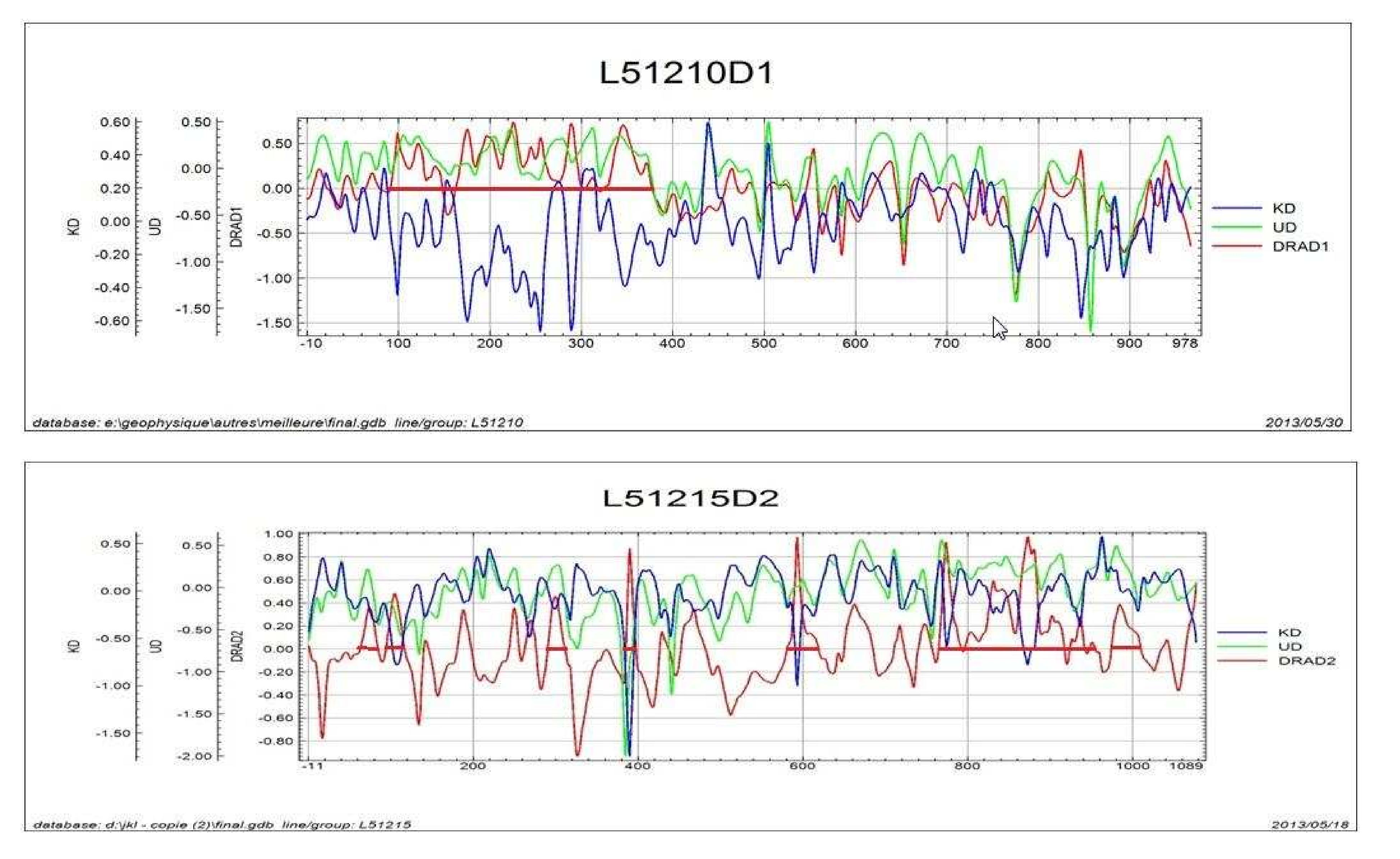


Fig V-11 : Les graphes des profils ayants donnés des résultats divergents

Description de la carte d'anomalie du DRAD 1:

La figure (V-12) représente la carte de localisation des anomalies du DRAD 1. Nous remarquons seulement quelques profils qui montrent des valeurs supérieure au égale 0.93 qui est la moyenne de toute la région plus trois fois l'écart type. Cette distribution montre deux zones bien définis qui présentent un potentiel en hydrocarbure. La première zone se situe entre les latitudes (27° 18' et 27° 20') et les longitudes (-08° 07' et -08° 08'), elle est caractérisée par une longueur de 4.6 Kilomètres. Elle couvre une superficie supérieure à 9 Km^2. La deuxième zone se situe entre les latitudes (27° 19' et 27° 21') et les longitudes (-08° 24' et -08° 25'), elle a une longueur de 3 Km et une superficie de 6 Km^2.

Description de la carte d'anomalie du DRAD 2:

La figure (V-13) représente la carte de localisation des anomalies du DRAD2. Nous remarquons aussi quelques profils qui montrent des valeurs supérieures ou égales à 0.88 (la moyenne de toute la région plus trois fois l'écart type). Elle montre la même distribution des anomalies que DRAD1. Elle présente aussi deux zones d'anomalies intéressantes mais il y a une petite différence entre la situation géographique de ces deux zones d'anomalies et celles des DRAD 1. La première zone se situe entre les latitudes (27° 18' et 27° 20') et les longitudes (27° 18' et 27° 21'), a la même forme et les mêmes dimensions que DRAD1. La deuxième zone et moins importante car elle a des dimensions très restreintes.

Remarque :

- Puisque la première zone du DRAD 1 et celle du DRAD 2 sont caractérisées par les mêmes situations géographiques (elles sont confondues) et elles ont les mêmes dimensions et surfaces, nous considérons cette dernière comme la plus intéressante permettant de prédire l'endroit favorable à la présence d'hydrocarbures.
- Nous négligeons les autres anomalies car elles sont caractérisées par des dimensions très petites (quelques centaines de mètres) par rapport à la première zone.
- Elle se situe également au niveau du contact entre la formation de Hammada Quaternaire et Quaternaire indifférencié.

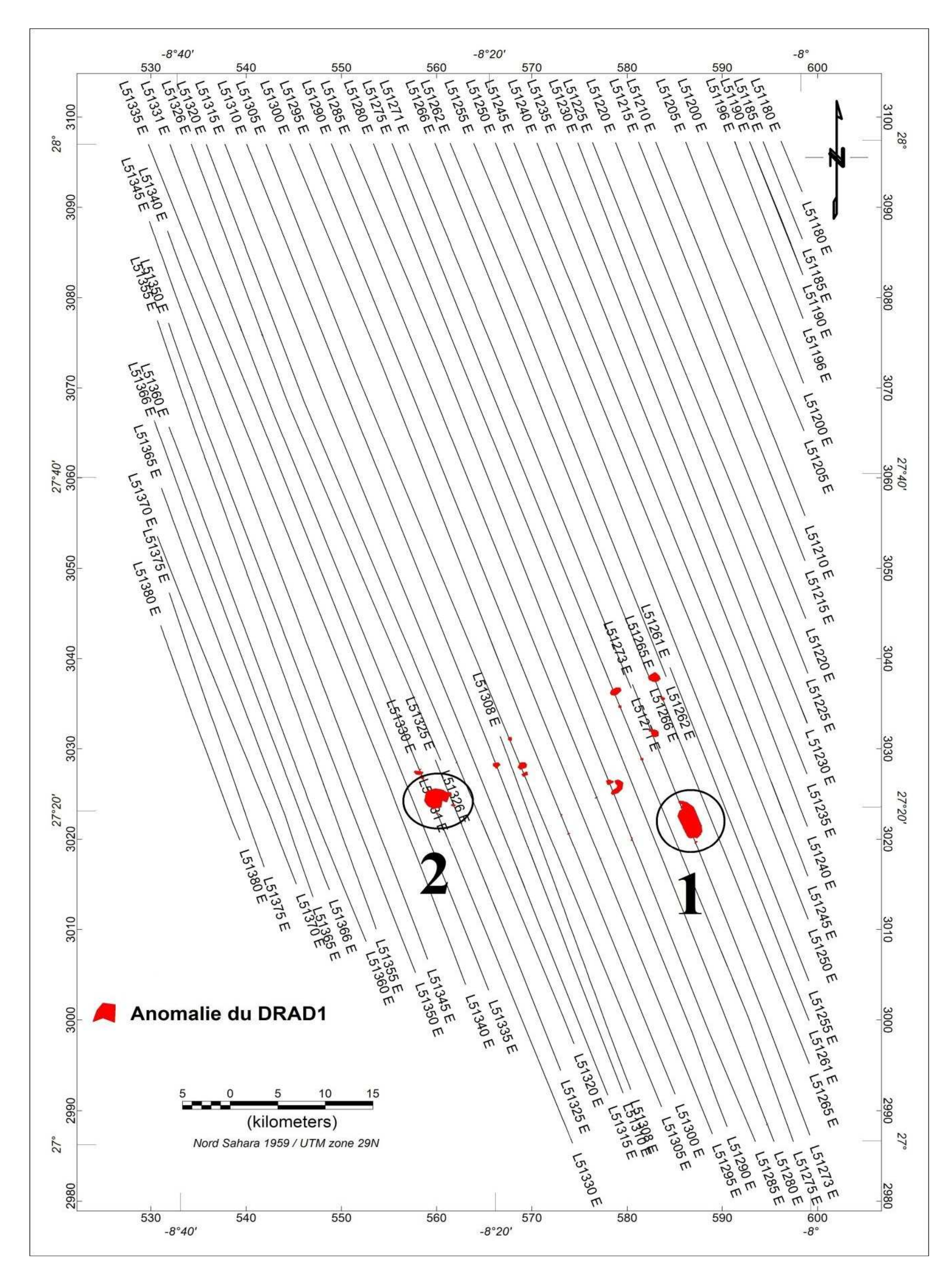


Fig V-12 Localisation des anomalies du DRAD 1

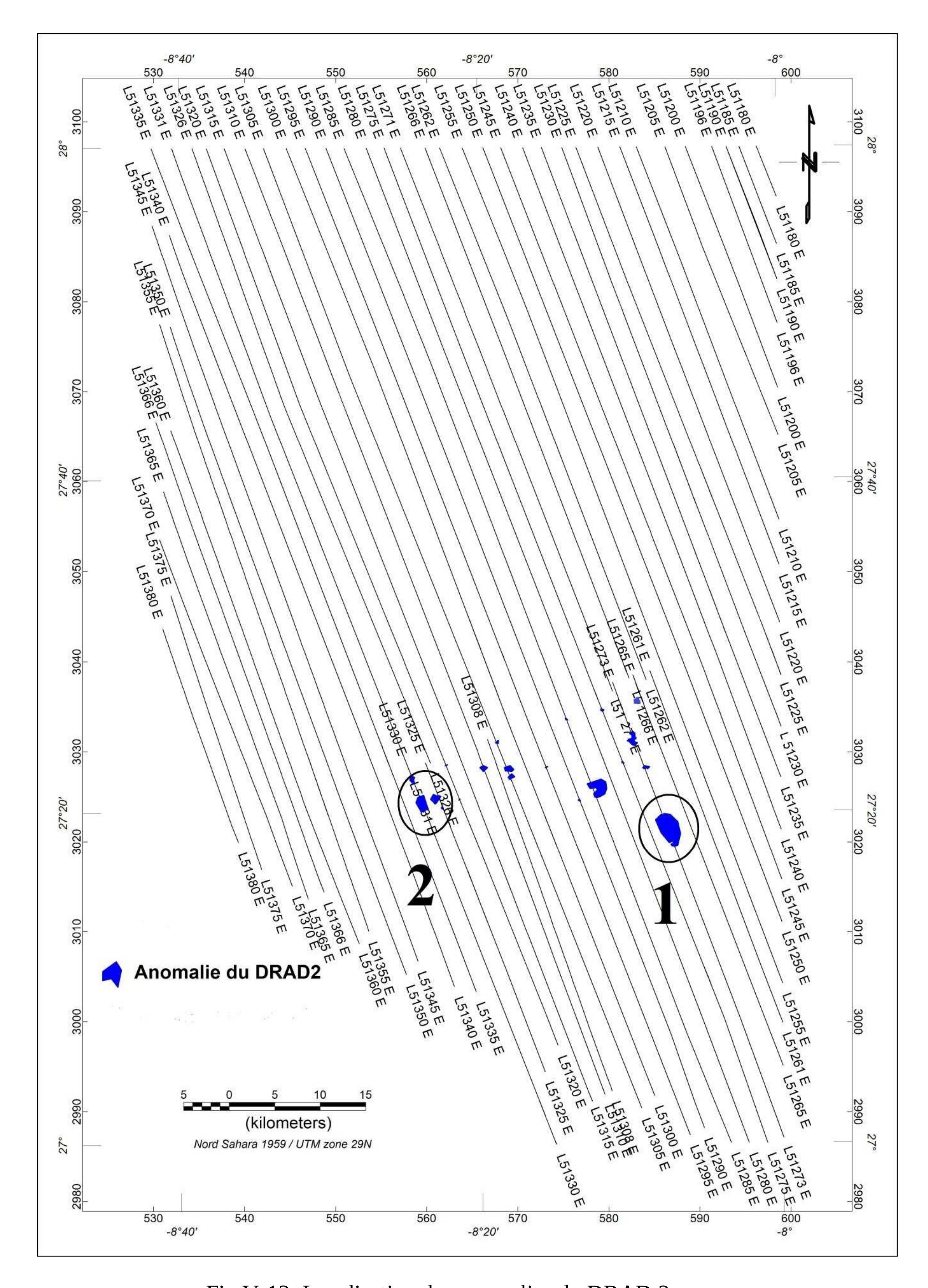
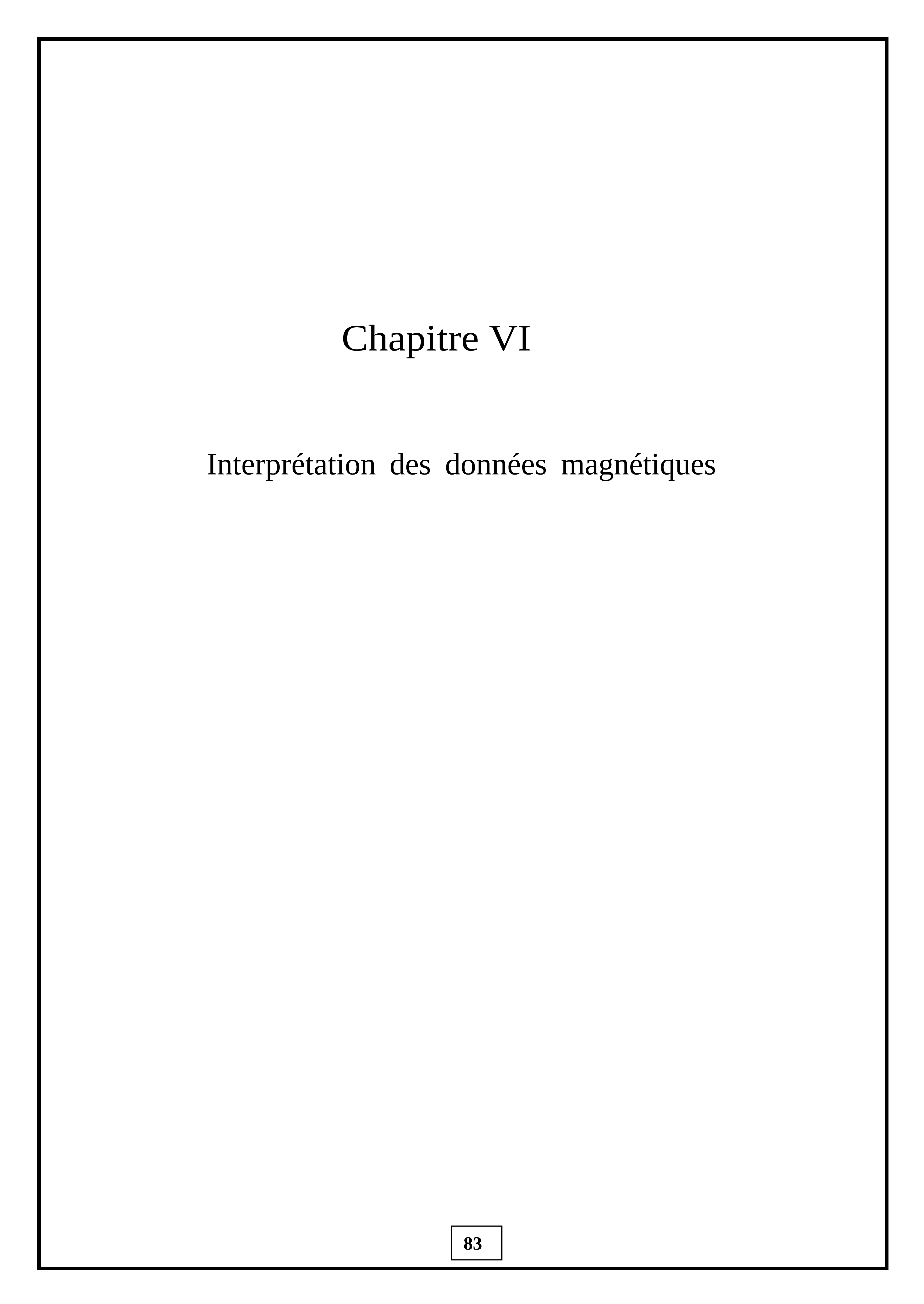


Fig V-13 Localisation des anomalies du DRAD 2

V-7-Conclusion :

- ✓ Selon les cartes de distribution des DRAD, La région de Graret l'Edda est caractérisée par des indices d'existence d'hydrocarbures qui occupent presque le tiers (1/3) de sa surface et orientés du Sud-ouest vers le Nord-est.
- ✓ Les cartes de localisations des anomalies pour les deux DRAD montrent des limites biens précises pour la zone qui a été considérée potentielle en hydrocarbures.
- ✓ La méthode simplifiée est acceptable pour tester l'existence des anomalies d'hydrocarbures car dans cette étude il y a 18 profiles parmi les 21 qui présentent des anomalies, mais la méthode de la régression linéaire reste la meilleure pour faire une interprétation précise.



Chapitre VI

Interprétation des données magnétiques

Introduction :

En plus de la méthode spectrométrique il ya la méthode aéromagnétique (magnétique) qui a un rôle important pour la détection d'hydrocarbures car elle est caractérisée par deux avantages : la détection a partir de la surface des anomalies géochimiques et l'identification des pièges structuraux (anticlinaux) ou s'accumulent les hydrocarbures. Dans ce chapitre nous avons développé de façon sommaire sur le premier avantage et nous avons fait une application sur le second.

VI-1 Le champ géomagnétique :

Le champ magnétique terrestre ou champ géomagnétique c'est un phénomène variable dans l'espace et dans le temps, caractérisé par sa direction et son intensité en chaque point de la surface du globe terrestre. Le champ géomagnétique est la somme de deux parties :

Un champ interne : dont les sources sont intérieures à la terre, ce dernier est la somme de deux termes :

- Un champ principal (régulier) ayant pour siège la surface du noyau externe et dont les longueurs d'onde sont typiquement de l'ordre de quelques milliers de Km. Ce champ représente en moyenne 99 % du champ observé à la surface du globe.
- Un champ crustal d'anomalies locales dont les longueurs d'onde sont généralement inférieures à quelques centaines de Km. Ce champ est engendré par les roches aimantées de la croute.

Un champ externe : d'intensité beaucoup plus faible, plus rapidement variable dans le temps dont les sources sont situées dans la haute atmosphère. Ce champ est caractérisé par :

- Des fluctuations périodiques (journalières, lunaires et annuelles) résultants de la distorsion du champ magnétique terrestre par les vents solaires.
- Des pulsations aléatoires rapides et faibles causées par des oscillations dans l'ionosphère et la magnétosphère.

- Des jours agités et des orages magnétiques à début brusque, dus à l'arrivée d'une bouffée de plasma émise par le soleil, et qui provoquent les aurores polaires.

VI-2-Magnétisme de la terre :

VI-2-1- Les éléments du champ géomagnétique :

En chaque point de la surface de la terre, le champ géomagnétique « B » est représenté par son intensité « F » comme grandeur vectorielle, ce vecteur change son orientation d'un point à l'autre. La complexité de l'orientation du vecteur du champ total nécessite sa décomposition dans un système à 3D (Telford et al, 1998). Dans un système orthogonal, les éléments du champ principal et leurs descriptions sont illustrés par la figure VI-1 et le tableau VI-1 :

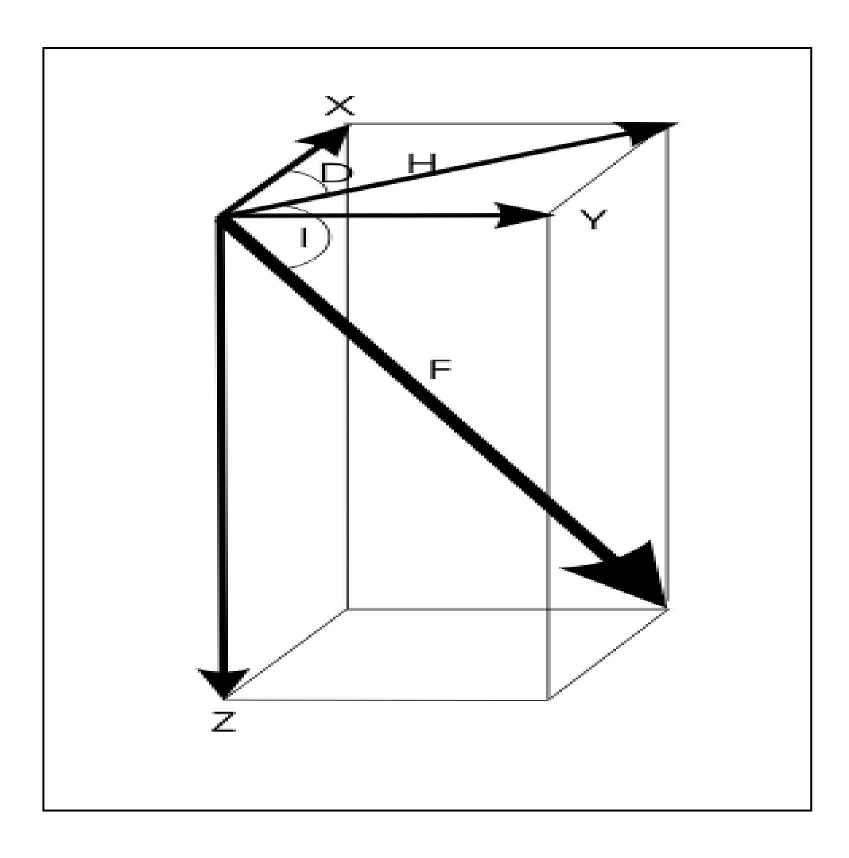


Fig VI-1 : les éléments du champ magnétique

Composant	Description
F	intensité totale du vecteur champ magnétique
H	composante horizontale du vecteur champ magnétique
Z	composante verticale du vecteur champ magnétique; par convention, Z est positif vers le bas
X	composante nord du vecteur champ magnétique
Y	composante est du vecteur champ magnétique
D	déclinaison magnétique, définie comme étant l'angle entre le nord vrai et la direction de la composante horizontale du champ magnétique, mesurée vers l'est à partir du nord vrai
I	inclinaison magnétique, soit l'angle que fait le vecteur champ magnétique par rapport au plan horizontal et dont la valeur est positive vers le bas

Tab VI-1 : les éléments du champ magnétique et leurs descriptions

Ces éléments sont reliés par les relations suivantes :

$F^2 = H^2 + Z^2 = X^2 + Y^2 + Z^2$ ………………………………….(1)

$H = F\cos(I)$ $Z = F\sin(I)$ ……………………..…..….(2)

$X = H\cos(D)$ $Y = H\sin(D)$ ……………………….……….(3)

VI-2-2 Origine du champ principal :

Les analyses mathématiques du champ observé à la surface du globe démontrent qu’au moins 99% est causé par des sources internes et 1% par des sources extérieures à la terre. Pour expliquer les mécanismes des sources internes, plusieurs théories ont été avancées.

La théorie actuelle est celle de la Dynamo, cette dernière suggère que le champ magnétique terrestre est crée et entretenu par un processus d'induction des courant électriques intenses circuleraient dans le noyau extérieur possédant une conductibilité électrique très forte (noyau extérieur : la partie liquide du noyau située entre 2800 et 5000 Km de profondeur).

On assume aujourd'hui que la noyau est une combinaison de fer (Fe) et de nickel (Ni), tous deux de bon conducteurs électriques. Même si le noyau était formé d'éléments moins conducteurs, l'énorme pression retrouvée presser les électrons de façon à former des gazes à électrons libres de conductivité satisfaisante. La source magnétique est illustrée par le modèle auto-excité. C'est-à-dire, un fluide de grande conductivité bouge dans un mouvement complexe et des courants électriques sont causés par des variations chimiques produisant un champ magnétique

VI-2-3 Variations du champ géomagnétique :

Durant la réalisation d'un levé magnétique dans un endroit donné, on remarque que les mesures, prises dans le même point, varient en fonction du temps. On distingue deux types de variation (Chouteau, 1999) :

- Les variations de courtes périodes (annuelles ou moindres), sont causées essentiellement par des courants électriques circulant dans l'ionosphère et la magnétosphère. Ces variations temporelles sont connues sous le nom de variations transitoires.
- Les variations de longues périodes trouvent leur origine dans le noyau et sont appelées variations séculaires. Ces dernières sont souvent représentées sous forme de cartes isopores indiquant le taux de variation en nT/an pour l'intensité du champ ou en *degré/an* pour l'inclinaison et la déclinaison magnétique

VI-3-Propriétés magnétiques des roches :

VI.3.1. La susceptibilité magnétique « χ » :

La susceptibilité magnétique χ (Kappa), caractérise l'attitude ou la possibilité d'une roche de s'orienter sous l'influence d'un champ ambiant.

$$J = \chi H \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(4)$$

Où :

J est l'aimantation et H l'intensité du champ.

La susceptibilité magnétique χ représente la constante de proportionnalité dans l'expression de la loi d'aimantation. Les susceptibilités les plus élevées sont rencontrées généralement dans les roches ignées basiques, tandis que les plus faibles dans les roches sédimentaires.

VI.3.2. La perméabilité magnétique μ :

C'est la capacité des roches de changer leurs inductions sous l'effet d'un champ externe. Elle représente la constante de proportionnalité dans l'expression de l'induction magnétique B.

a. Perméabilité dans le vide :

$B = \mu_0 H$ ……………………………………(5)

$\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ [H/m] (SI) ……………………………………(6)

b. perméabilité dans le milieu :

$\mu = 1 + \chi$ (cgs) ……………………………………………………(7)

$\mu = 1 + 4\pi\chi$ (SI) …………………………………………………….(8)

c. Perméabilité relative :

C'est le rapport de l'induction magnétique dans le milieu et celle dans le vide :

$\mu_r = B/B_0$ ……………………………………(9)

VI.3.3. L'aimantation rémanente des roches :

Les roches ignées et sédimentaires possèdent un champ magnétique permanent (rémanent) à des degrés divers. La direction de ce champ rémanent peut être complètement différente de la direction du champ local, elle est caractéristique du champ local lors de la formation de la roche.

L’aimantation rémanente d’une roche est une aimantation permanente acquise par la roche appelée : aimantation rémanente naturelle ARN (Natural Remanent Magnitization NRM). Dans plusieurs cas, l’aimantation des roches dépend principalement de l’existence d’un champ magnétique ambiant en présence de minéraux magnétiques dans la roche. Ce phénomène est très compliqué, il dépend de la genèse de la roche.

VI.3.4. Classes magnétiques de matériaux :

Le magnétisme des matériaux dépend des moments magnétiques des atomes ou ions. Selon la susceptibilité magnétique, on distingue trois grandes classes (Chouteau, 1999) :

Le diamagnétisme :

Un diamagnétique parfait offre une grande résistance au passage du champ magnétique Fig VI-2. Les lignes de champ **H** ne pénètrent pas dans le matériau. La perméabilité est donc nulle. Ex : graphite, gypse, marbre, quartz, sel, gaz rares, bismuth, cuivre et diamant.

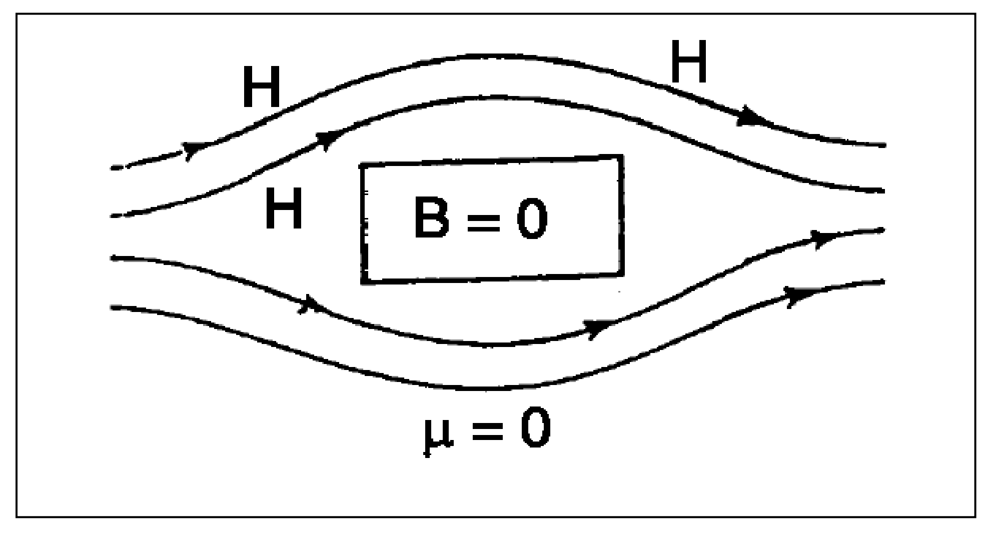


Fig VI-2 : Comportement d’un matériau diamagnétique placé dans un champ magnétique.

Le paramagnétisme :

Par définition, tous les matériaux qui ne sont pas diamagnétiques sont paramagnétiques, c’est-`a- dire k > 0. Dans un matériau paramagnétique, chaque atome a un moment magnétique non-nul. Sous l’action d’un champ externe, ces moments magnétiques s’orientent et augmentent le champ H appliqué Fig VI-3.

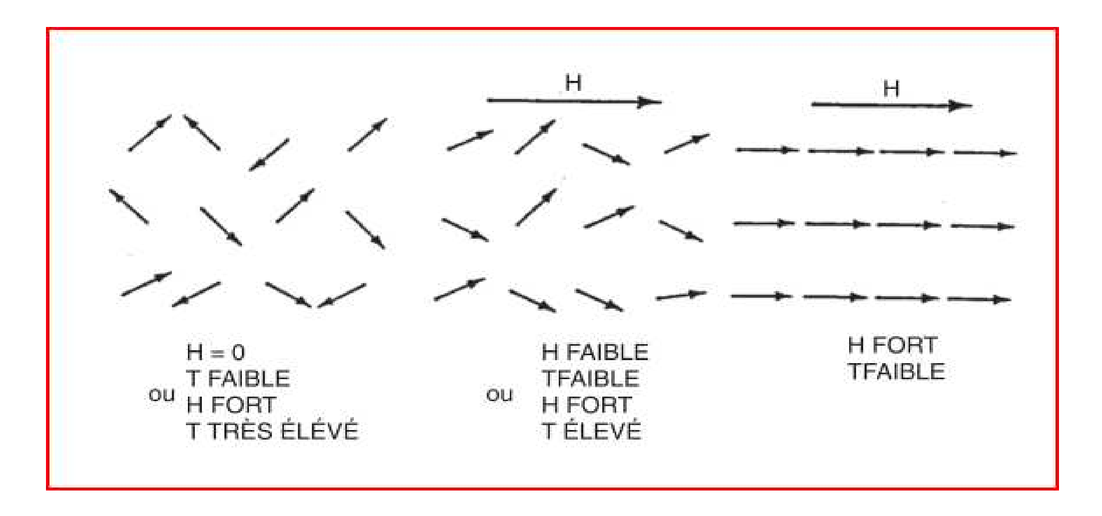


Fig VI-3 : Le paramagnétisme du matériau

Action combinée de la température et d'un champ externe sur un matériau paramagnétique. Les vecteurs symbolisent les courants magnétiques atomiques. Comme pour le diamagnétisme, il s'agit d'un phénomène faible et temporaire. Contrairement au diamagnétisme, la réponse d'un matériau paramagnétique vise à renforcer l'action du champ H externe. Notons que ce phénomène diminue avec l'augmentation de la température puisque l'agitation thermique désoriente les dipôles magnétiques élémentaires. La plupart de métaux sont paramagnétique.

Le ferromagnétisme :

La magnétisation d'un matériau ferromagnétique correspond à l'orientation des dipôles élémentaires dans une même direction. a la différence des paramagnétiques, cette orientation peut se faire spontanément, en l'absence d'un champ H externe.

Si on place un matériau ferromagnétique dans un champ H externe, les parois vont se déplacer de manière à renforcer le champ H externe Fig VI-4. Si H augmente beaucoup, le domaine favorablement orienté occupera tout le volume du matériau qui est alors magnétisé à saturation.

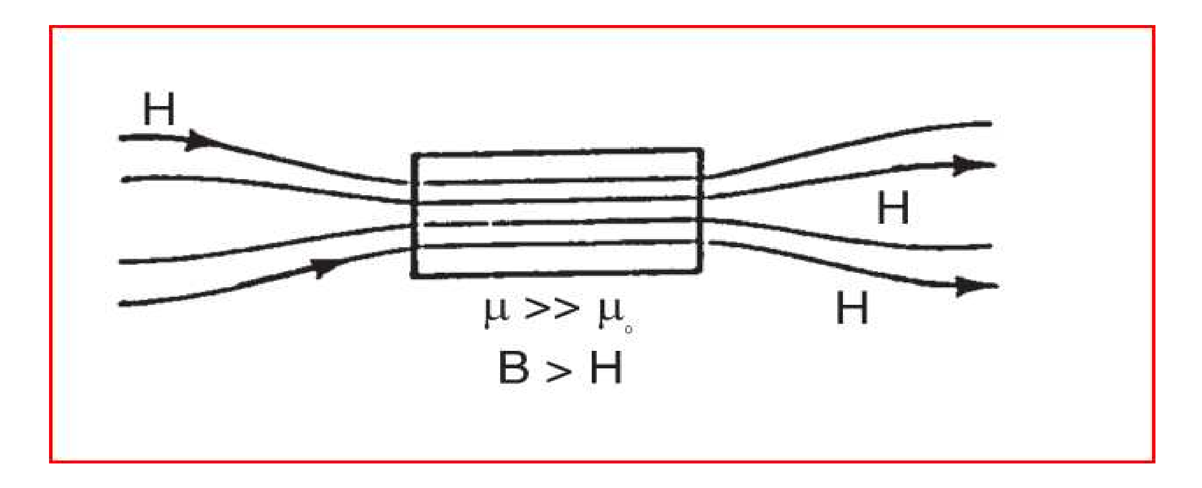


Fig VI-4 : Comportement d'un matériau ferromagnétique dans un champ magnétique H

VI.4. Lois fondamentales du magnétisme :

a) Force magnétique :

La loi de coulomb pour un pôle magnétique (système cgs) nous dit :

F= $\frac{p1\ p2}{u\ r2}$ **r** …………………………………(10)

Ou :

F = force en dynes (cm· g/s2 = 10−5 N)

p1, p2 = masses magnétiques ou pôles (emu)

r = distance entre les deux pôles

r = vecteur unitaire selon la droite joignant m1, m2

µ = perméabilité´ e du milieu autour des pôles = 1 dans le vide et l'air

La notion de pole est artificielle parce qu'elle ne peut exister par elle-même : elle a besoin d'une paire. Si deux pôles de 1 emu sont placés dans le vide ` a 1 cm l'un de l'autre, la force entre eux sera de 1 dyne. La force est attractive si les deux pôles sont de signes opposes et répulsive s'ils sont de même signe.

Par convention, un pole est positif s'il est attiré par le nord magnétique de la terre et négatif s'il est attiré par le pole sud.

b) Champ magnétique :

Un pole magnétique p1 apporté a un point de l'espace est soumise a l'attraction émanant d'un autre pole magnétique p situé a une distance r de ce point. L'intensité du champ magnétique H est définie comme la force exercée sur un pole unitaire :

H= $\frac{F}{p1}$ r = $\frac{p}{u\,r2}$ r ………………………………….(11)

On suppose que p1 n'est pas assez grand pour affecter le champ H au point de mesure, c'est-`a-dire que p1 ≪ p.

Origine électrique :
Le champ magnétique est produit par la circulation d'un courant électrique. D'après la loi d'Ampère, un courant I dans un conducteur de longueur Dl génère un champ DH qui vaut

DH = (I Dl) × r1/4πr^2 ………………………………….(12)

Ou r est la distance entre Dl et le point d'observation et ou **r**1 donne la direction de r. Si un courant se propage dans une boucle circulaire, cette boucle agit alors comme un dipôle magnétique situe au centre de la boucle. On comprend de cette façon que le mouvement des électrons autour du noyau atomique génère un moment dipolaire magnétique.

c) **Moment dipolaire magnétique :**

Il n'y a pas de pole magnétique libre. Seul le dipôle, association de deux pôles −p et +p séparés d'une distance l, a une signification physique. Le moment magnétique **M** du dipôle est un vecteur dirigé suivant la droite joignant −p à +p, orienté de −p à +p et d'intensité :

m = plr ………………………………….(13)

d) **Intensité de la magnétisation :**

Un corps magnétisable placé dans un champ magnétique externe sera aimanté par induction. L'intensité de la magnétisation M est définie comme le moment magnétique par unité de volume V :

M= $\frac{m}{v}$ ………………………………….(14)

Le vecteur M porte souvent le nom de polarisation magnétique parce que l'induction tend à aligner les dipôles du corps magnétique. Le vecteur **M** peut aussi être vu comme la force des pôles par unit´e de surface S aux extrémités, c'est-a-dire

M= $\frac{p}{s}$ ………………………………….(15)

e) **Susceptibilité magnétique :**

L'intensité de la magnétisation **M** est proportionnelle à la force du champ et sa direction est dans celle du champ. Le degré de magnétisation d'un corps sera déterminé par sa susceptibilité magnétique k.

$k = \frac{M}{H}$ M= k H ………………………………….(16)

En prospection magnétique, la susceptibilité magnétique est un paramètre fondamental, puisque la réponse magnétique des roches est fonction du contenu en matériel magnétique, qui lui aura une susceptibilité beaucoup plus grande que celle de la roche elle-même. La susceptibilité dans le système cgs diffère de la susceptibilité´e en unités SI, tel que

$k_{SI} = 4\pi k_{cgs}$ ………………………..……….(17)

f) **Induction magnétique :**

Un corps magnétique placé dans un champ magnétique externe H, aura ses pôles magnétiques plus ou moins alignés sous l'effet de H, produisant un champ H' relié à l'intensité de la magnétisation M. L'induction magnétique B sera alors le champ total incluant l'effet de l'aimantation.

Système SI :

En unités SI, B = μ_o H dans le vide (ou dans l'air). Si le matériel est polarisable, alors

B = $\mu_o(H + H')$ ou $H' = M$ ………………………………….(18)

= $\mu_o H + \mu_o k H$

= $\mu_o(1 + k)H$

= $\mu_o \mu H$

Ou
– μ = (1 + k) est la perméabilité´e du matériau
– μo = perméabilité´e du vide (de l'air) = $4\pi \times 10^{-7}$ (henry/m)
– B = en tesla (T) ou weber/m2
– H = en A/m.
En géophysique, on mesure des variations de B qui sont de l'ordre de 10^{-4} fois l'amplitude du champ terrestre, qui est environ 50 μT. On utilise alors le nano tesla (ou son équivalent le *g*) comme unit´e de mesure.

Système cgs :

$B = H + H^{/}$ ………………………………..……….(19)

$= H + 4\pi M$

$= (1 + 4\pi k)H$

Par définition, le rapport de l'induction sur le champ magnétique principal est la perméabilité μ.

$B = (1 + 4\pi k)H$ ………………………………….(20)

$= \mu H$
Dans ce système,
B : gauss
H : oersted
On a donc que la perméabilité´e magnétique µ = (1 + 4pk).

g) Potentiel magnétostatique :

Comme en gravimétrie, le champ magnétique H est un champ conservatif. Il peut donc s'exprimer comme le gradient d'un potentiel scalaire. Le potentiel étant le travail nécessaire pour déplacer un pole unitaire entre deux points dans le champ magnétique, nous avons :

$H(\mathbf{r}) = -\nabla A(\mathbf{r})$ ………………………………….(21)

ou ∇ est donné par
$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} i + \frac{\partial}{\partial y} j + \frac{\partial}{\partial z} k$ ………………………………….(22)

et A est le potentiel,
$A(\mathbf{r}) = \int_{-\infty}^{r} H(r)dr = \frac{m}{ur}$ ………………………………….(23)

Puisqu'un dipôle magnétique seul est une notion fictive, le potentiel magnétique scalaire est une notion plutôt nébuleuse. Une entité plus palpable est le dipôle magnétique.

Potentiel magnétostatique du dipôle :
Soit un dipôle placé en un point O de l'espace. On peut calculer son potentiel A en un point P situe à une distance r de O Fig VI-5.

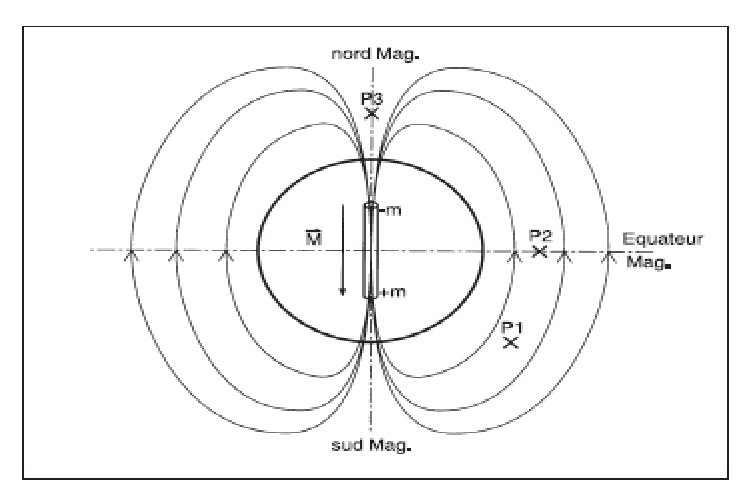


Fig VI-5 : Potentiel magnétostatique du dipôle

Si on pose μ = 1, on trouve à partir de l'´equation 23

$$A = -\frac{m}{r1} + \frac{m}{r2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(24)$$

$$= \frac{m(r1-r2)}{r1r2}$$

A la limite, si r $\gg$ l, alors r1 − r2 = l cos θ et r1 $\approx$r2 $\approx$ r, alors

$$A = lm\frac{\cos\theta}{r2}$$
$$= |m|\frac{\cos\theta}{r2}$$

Le champ H est obtenu en prenant H = −∇A. On obtient deux composantes, l'une Hr radiale et l'autre H θ tangentielle, ou

$$Hr = \frac{2|m|}{r3}\ \cos\theta$$
$$H_\theta = \frac{|m|}{r3}\ \sin\theta$$

Ainsi, le champ du dipôle est inversement proportionnel au cube de la distance. Quand θ = 0 ou *p*, nous sommes dans un cas appel´e la première position de Gauss, et

$Hr = \frac{2|m|}{r3}$ $H\theta = 0$

Quand $\theta = \theta /2$ ou $3\,\theta /2$, le cas est dit celui de la deuxième position de Gauss, et

$Hr = 0$ $H\theta = \frac{|m|}{r3}$

VI.5. La prospection magnétique :

VI.5.1 Description des prospections magnétiques :

La prospection magnétique est une méthode géophysique permettant de mesurer les variations de l'intensité du Champ Magnétique Terrestre (CMT). C'est une méthode dite passive car l'origine du CMT est naturelle et n'est pas contrôlée. La méthode magnétique est utilisée notamment pour la recherche de concentrations ferreuses naturelles (gisements) ou anthropiques (tuyaux, pilonnes, etc..). Une de ses applications également est la détection pyrotechnique (bombes non explosées, UXO en anglais).

VI.5.2 Principe des méthodes magnétiques :

Au cours d'une prospection magnétique, l'opérateur mesure généralement les variations d'un point à un autre de l'intensité du CMT en utilisant un magnétomètre. Le CMT est la résultante de plusieurs composantes plus ou moins profondes (l'origine de la plus grande partie de ce champ se situe dans le noyau terrestre) et même externe (couches ionisées de l'atmosphère).

Le champ magnétique terrestre étant un champ vectoriel, les prospections magnétiques peuvent mesurer soit l'amplitude totale (méthode la plus répandue), les directions, les angles du vecteur champ magnétique ou les projections de ce vecteur selon certaines directions. Certains appareils mesurent les pseudo-gradients (différences d'une composante du champ entre deux points, on parle de gradiomètre vertical quand il s'agit de mesurer le gradient de la composante verticale), voire le tenseur complet du champ.

Dans les domaines d'application de la prospection de sub-surface, il faudra donc éliminer l'influence des sources trop profondes et externes (d'autant plus qu'elles varient dans le temps) pour ne garder que les sources les plus superficielles. L'unité de mesure est le nanoTesla (nT). Le champ magnétique total est voisin de 45000nT. Les variations temporelles et profondes sont généralement retirées en mesurant ou en calculant un pseudo-gradient local (différence entre deux capteurs plus ou moins proches). Le travail en « boucle de mesure » (qui refait passer sur certains points de mesure à deux instants distincts) permet aussi de limiter les effets des dérives temporelles. Les anomalies mesurées peuvent atteindre plusieurs milliers de nT (fer sous forme métallique) à 0,1nT

(anomalies en archéologie dues à des trous de poteau par exemple).

Généralement, les prospections dans le domaine de la sub-surface ne s'intéressent qu'au magnétisme induit et/ou thermo-rémanent (acquis suite à l'action du feu) des

couches les plus superficielles. Les sources superficielles de magnétisme sont très souvent liées aux minéraux ferromagnétiques, liés soit à la roche mère, soit à des processus pédologiques, soit à une activité anthropique passée ou présente. L'aimantation est en fait mesurée au travers d'une propriété spécifique : la susceptibilité magnétique. L'intensité de l'aimantation mesurée est le produit de la susceptibilité magnétique par le champ magnétique. La mesure de l'intensité du CMT est donc une mesure indirecte des variations de la susceptibilité magnétique (nommé Khi). Les mesures électromagnétiques sont également capables de mesurer directement la susceptibilité mais la mesure dans ce cas est beaucoup plus complexe.

Comme dans les autres méthodes de prospection géophysique, on arpentera le terrain à investiguer sous forme de profils dont l'espacement sera essentiellement fonction de la profondeur des cibles recherchées (espacement d'autant plus important que la cible est profonde) et de la variabilité locale des terrains.

VI.6. Utilisation de la méthode de magnétométrie pour la détection d'hydrocarbures :

VI.5.1 A partir de la surface :

Le magnétisme des roches peut être un indicateur de présence de réservoirs d'hydrocarbures. Toutefois, suivant le taux de bactéries présentes, la qualité du pétrole est dégradée et les propriétés magnétiques changent. Détails sur le casse-tête des chercheurs de pétrole. La recherche de nappes de pétrole souterraines se fait par sismicité ou par l'étude des anomalies gravimétriques. Toutefois, seule la prospection par forage est en mesure de certifier la présence de pétrole.

Comment détecte-t-on les réservoirs de pétrole souterrains ? La principale méthode consiste simplement à étudier la sismicité de la zone géologique considérée. Les échos permettent de cartographier des couches de roche à plus de dizaines de mètres de profondeur. On utilise aussi de plus en plus les données satellitaires, car les anomalies de gravité détectées peuvent indiquer la présence de corps rocheux susceptibles de piéger du pétrole.

Certains utilisent les cartes d'anomalies magnétiques pour détecter la présence de pièges pétroliers, mais la méthode est assez controversée. Les spécialistes en hydrocarbures soupçonnent depuis longtemps qu'il existe un lien entre les hydrocarbures et le magnétisme, mais aucun n'avait jusqu'alors été en mesure

d'identifier leur connexion. Dans une nouvelle étude, publiée dans la revue Geochimica et Cosmochimica Acta, une équipe internationale met en évidence pour la première fois

que les hydrocarbures piégés en profondeur modifient les propriétés magnétiques des roches environnantes.

Les anomalies magnétiques peuvent être un bon indicateur des nappes souterraines d'hydrocarbures. Néanmoins, les anomalies magnétiques peuvent être faussées en de la dégradation de la qualité du combustible fossile. Sous terre, les hydrocarbures ont un effet positif dans la formation des minéraux aimantés. Toutefois, l'effet positif n'est pas permanent. À n'importe quel moment, des bactéries peuvent s'introduire dans les hydrocarbures et dégrader les propriétés raison magnétiques des roches. En respirant, les bactéries transforment la magnétite en hématite, un minéral nettement moins aimanté. Le développement des bactéries semble donc avoir un effet atténuant sur la signature magnétique des roches souterraines.

Roches aimantées par le pétrole puis désaimantées :

La qualité du pétrole est déterminée par les teneurs de ses différents composants. Lorsque les bactéries s'introduisent dans les hydrocarbures, elles les dégradent et réduisent la qualité du pétrole. Dans cette étude, l'équipe de recherche, menée par la géologue Stacey Emmerton de l'Imperial Collège London a comparé la composition chimique et le taux de dégradation bactérienne d'échantillons d'hydrocarbures à leur sensibilité et leur minéralogie magnétique.

C'est la première étude à combiner de nombreuses données géochimiques et magnétiques d'échantillons d'hydrocarbures issus du Canada, de Colombie, d'Indonésie et du Royaume-Uni. L'étude montre que la baisse de la qualité du pétrole, directement liée à la quantité de matière organique extractible présente, entraîne une nette diminution de la susceptibilité magnétique. Les chercheurs concluent donc que le processus de biodégradation des hydrocarbures par les bactéries a un double effet. D'une part, la qualité des hydrocarbures diminue et d'autre part, des signatures magnétiques sont détruites.

La compréhension des signatures magnétiques des roches à proximité des réservoirs d'hydrocarbures pourrait aider les compagnies pétrolières à mieux interpréter les cartes d'anomalies magnétiques, et donc à mieux cibler les réservoirs de pétrole.

VI.6 .2. l'utilisation de la magnétométrie pour la détermination des pièges structuraux et application sur les données réelles :

Généralement, se que nous cherchons avec la magnétométrie c'est la structure anticlinale qui reflète une formation plissée dont une nature sédimentaires. L'apparition d'une anomalie magnétique positive est causée par plusieurs facteurs, les deux principaux facteurs sont :

- La variation de la lithologie du socle : une variation de la susceptibilité magnétique d'une formation donne une anomalie positive Fig VI-6-A.
- La formation d'anticlinal qu'est causée par la remonte du socle (déplacement d'un bloc par rapport à l'autre) Fig VI-6-B.

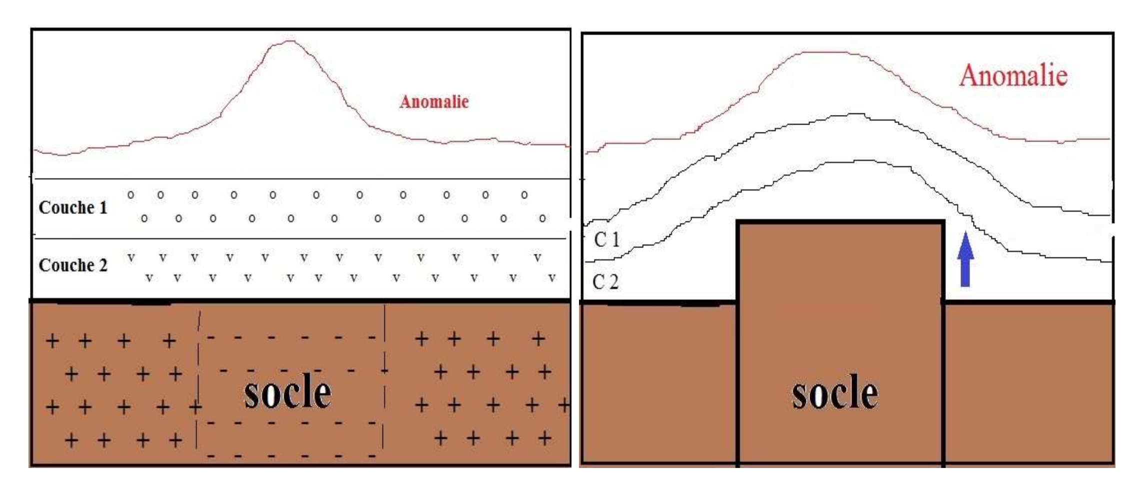


Fig VI-6 : **A :** anomalie magnétique due à la variation de la lithologie du socle (intrasocle). **B :** anomalie magnétique due à une structure en horst affectant le socle (suprasocle).

L'examen de la carte magnétique de notre région d'étude FigVI-7, montre la présence d'une large anomalie positive centrée aux coordonnées 8° 5' Ouest et 27° 20' Nord. Sa direction est Est-Nord Est (E-NE). L'allure des courbes des isovaleures du champ magnétique présentent des déflexions en plusieurs endroits qui seraient en relation avec la présence d'un système de fractures FigVI-7.

L'interprétation de cette anomalie suggère une structure faillée en forme de horst (suprasocle), qui serait en faveur de la présence fort probable d'un anticlinal.

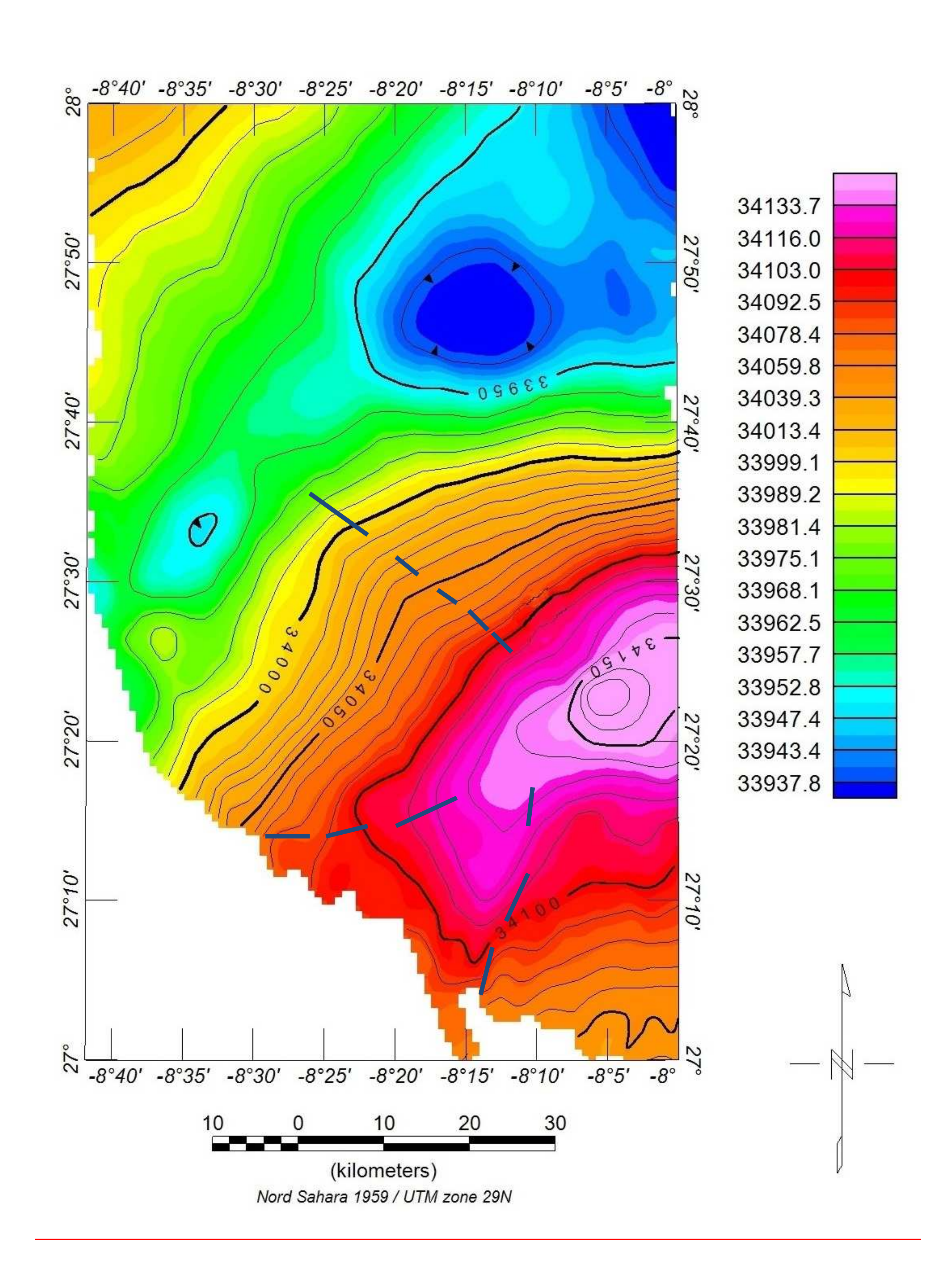


Fig VI- 7: carte magnétique des donnée brutes

VI.7 Combinaison entre la carte magnétique et celle d'aérospéctrométrique :

Généralement, l'intensité du champ magnétique varie de façon monotone du cotée nord-ouest vers la cotée sud-est, tel que les valeurs faibles du champ sont localisée en nord-est et les grands valeurs du champ sont localisée au sud-est, la partie principale est localisée au sud de la zone d'étude et située entre les latitudes 27°30 ' et 27°20 ' Nord et les longitudes 8° 00' et 8° 30' W et c'est la même chose par rapport la distribution des DRAD tel que l'anomalie magnétique positive est confondu sur l'anomalie du DRAD Fig VI-8.

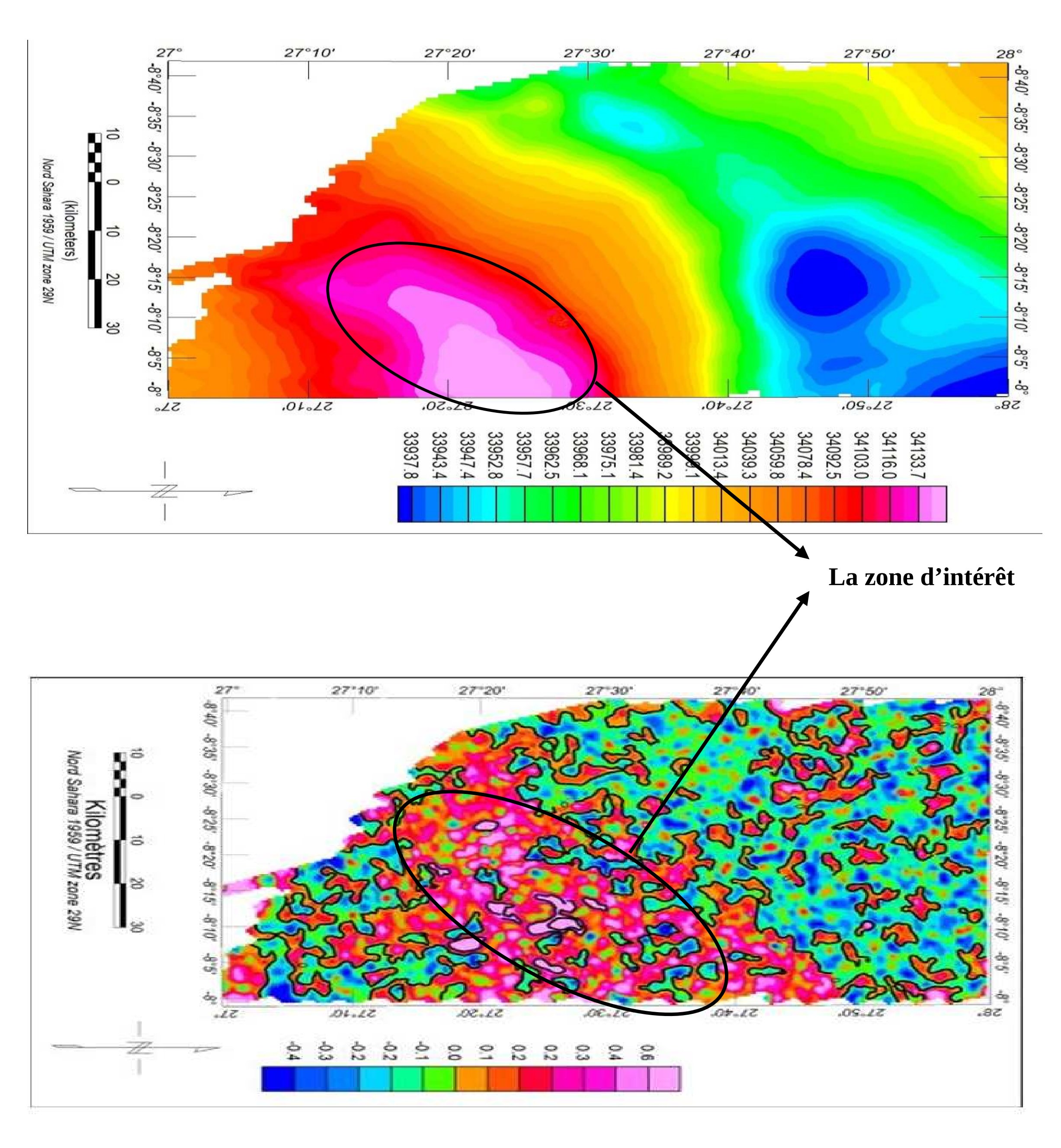


Fig VI-8 combinaison entre la carte du DRAD et celle du magnétique

Conclusion :

A partir de la carte magnétique et la carte du DRAD, nous avons remarqué deux anomalies très important qui sont localisés dans la même zone, on peut dire que les grands valeurs de DRAD positifs reviennent a la remonte des bulles de gaz et les particules d'hydrocarbures qui traversent le réseau de fracturation qui se trouvent dans les différents formations rocheuses et la source ou bien l'origine du ces bulles peut être le piège structurale qui est marqué par l'anomalie magnétique.

Conclusion générale et perspective :

Notre étude s'est portée sur l'extrême sud-ouest du bassin de Tindouf dans la région de Graret l'Edda qui se situe dans un vaste bassin peut explorée. La superficie globale du bassin de Tindouf est de 130000 Km^2 et il y a 6 forages qui ont été réalisé à l'échelle de tout le bassin (un forage par 22000 Km^2). Pour notre région qui a 5800 Km^2, un seul forage a été réalisé à l'extrémité sud-ouest (puits HTn1) et qui se termine dans les formations Cambriennes à 2535 m de profondeur. Ses coordonnées sont les suivantes dans le système UTM (X = 545 Km, Y = 3029 Km).

A la suite d'une série de traitements, nous avons établi les cartes des DRAD et les cartes de localisation des anomalies de la région d'étude ayant servi comme document de base pour l'interprétation. Pour conclure cette étude nous montrons l'importance et l'efficacité de la méthode géophysique aéroportée plus précisément la spectrométrie gamma pour la détection indirecte d'hydrocarbures .Le travail proprement dit a été axé au traitement, à l'analyse et à l'interprétation des cartes spectrométriques obtenues à partir des mesures réalisées dans cette zone.

À l'extrémité Sud - Est de notre zone d'étude, nous remarquons un regroupement de petits ensembles d'anomalies qui caractérisent les contacts entre la formation de Hammada Quaternaire et le Quaternaire indifférencié qui sont négligeables par rapport à d'autres anomalies qui présentent une forte valeur des DRAD, c'est pour cela nous considérons la partie sud – est de Graret l'Edda comme une zone favorable à la présence d'hydrocarbures en profondeur.

La méthode d'analyse de Saunders basée sur la normalisation des radioéléments par le thorium donne une meilleure délimitation, supprime et limite les contributions

régionales géologiques et améliore les variations locales de la concentration des valeurs K et U. Cette technique est bases sur deux points essentiels: La teneur du thorium n'est pas modifiée par l'altération, et La relation entre (Th -K) et (Th-U) est linéaire.

La méthode de spectrométrie a donné des résultats intéressants au Etats Unies (USA) et en Australie . Pour ce est de notre part nous avons pu mettre en évidence une zone potentielle en hydrocarbures dans la région de Graret l'Edda qui fait partie d'un vaste bassin sédimentaire.

Nous nous sommes limités seulement à l'interprétation des cartes des anomalies des DRAD, mais pour qu'il y ait un résultat beaucoup plus appuyé il est important de les combiner avec les donnés magnétiques ou gravimétriques. Toutes ces interprétations doivent être confirmées par des travaux de mesures radiométriques au sol.

Bibliographie

BRGM, (2013) : Projet de géophysique aéroportée en Martinique : « MARTEM – Martinique Electromagnétisme », Dossier de presse, Martinique.

Carrier F, Utilisation de la spectrométrie gamma aéroportée (uranium, thorium, potassium) pour quantifier les processus d'érosion et d'altération, thèse Université Denis Diderot Paris

Curto J, (2012) : The role of airborne geophysics for detecting hydrocarbon microseepages and related structural features: The case of Remanso do Fogo, Brazil, GEOPHYSICS, VOL. 77, NO. 2

El-Sadek M, (2002) : Application of thorium-normalized airborne radio spectrometric Survey data of Wadi Araba area, North-eastern Desert, Egypt. As a guide to the recognition of probable subsurface petroleum accumulations

Groune D, (2009) : Analyse Magnéto-Spectrométrique des Données Aérogeophysique du Grand Fossé Pharisien (Hoggar Occidental), thèse UMBB-Algérie.

Jaona H, (2008) : Essai de cartographie par la Spectrométrie gamma et la Magnétométrie d'une zone a fort recouvrement latéritique et à faible densité d'affleurement. Cas D'Ambodilazana-Toamasina.

Richer M, (2009) : Levés pédogeochimiques et Radiométriques gamma de la partie ouest de la propriété Témiscouata, Rapport des travaux de 2008-2009, Les Appalaches.

Richer M, (2010) : Levé radiométrique gamma de la partie est de la propriété Témiscouata, Rapport des travaux de 2009-2010, Appalaches.

Salze D, (2008) : Etude des interactions entre uranium et composés organiques dans les systèmes hydrothermaux, thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré

Saunders D, (1993) : Relation of thorium-normalized surface and aerial radiometric data to subsurface petroleum accumulations, Australia.

Saunders D, (1994) : Tests of Australian aerial radiometric data for use in petroleum reconnaissance, Australia.

Schumacher D, (2012) : Hydrocarbon Microseepage - A Significant but Under utilized Geologic Principle with Broad Applications for Oil/Gas Exploration and Production, Annual Convention and Exhibition, Long Beach, California.

Schumacher D, (1999) : A General Overview of Hydrocarbon Microseepage, Abstracted from Schumacher, Surface geochemical exploration for petroleum, Exploring for traps and seals, AAPG.

Sylvain T, (2008) : Numérisation des données radiométriques de SOQUEM dans le Grenville, Projet 2007-02-Partie A, Consortium de recherche en exploration minérale.

Ebinger F. (2002) : Fiche Moyen d'investigation Méthodes magnétique Geometrics.

Georges M. (1979) : Présentation d'une carte magnétique de l'Atlantique Nord-Est

FLEURY S. (2011) : Méthode magnétique appliquée à l'exploration multiéchelle du Bassin de Franceville